

物理教室年次報告書

令和5年度

2024年3月
九州大学大学院理学研究院物理学部門

はじめに

本年次報告は、九州大学理学研究院物理学部門の 2023 年度の活動をまとめたものです。COVID19 が 5 月に 5 類感染症となり、様々な活動について、COVID19 以前への回帰傾向がますます強まりました。他方、COVID19 を契機として導入された制度・技術を継続的に活用すべきという見方もあります。物理学部門では、定例・臨時の運営会議を、引き続きオンラインで実施することといたしました。また、多様な学生のニーズに応えるものとして、ハイブリッド形式の講義を必要に応じて実施しています。

人事関係では、新たに工藤耕司助教(凝縮系理論)、松村央助教(宇宙物理理論)、調翔平助教(素粒子実験)、庭瀬暁隆助教(実験核物理)が着任されました。若手の方々ならではの形で、部門を活性化させていただきたいと思えます。一方、川越清以教授(素粒子実験)が定年退職され、名誉教授とられました。川越先生は平成 23 年に着任されて以降、素粒子実験研究室を主宰され、九州大学先端素粒子物理研究センター(RCAPP)の設立と運営に尽力されました。また、素粒子実験研究室の末原大幹助教が素粒子物理国際研究センター特任准教授として、複雑流体研究室の前多裕介准教授が京都大学工学研究科教授として、栄転されました。先生方の長きにわたる多大なご貢献に感謝するとともに、今後のご活躍・ご健勝を心よりお祈りします。

教育面では、9 月に学士 1 名(物理学コース)と博士 1 名(物理学専攻)を、3 月には学士 49 名、修士 45 名、博士 5 名を送り出しました。物理学科・物理学専攻で学んだことを活かし、新しいステージで活躍されることを期待しています。理学研究院が直面している問題として、博士後期課程の充足率不足があります。これまでの推移に照らして定員数見直しの検討が要請されていますが、国の施策として博士数向上が打ち出されている点や、数年前に導入されたフェローシッププログラムの効果が見え始めつつ現状も踏まえ、今後の慎重な対応が必要と思われれます。

他にも物理学部門の大きなニュースがいくつかあります。まず、野村健太郎教授(凝縮系理論)が提案された「トポロジーに基づく創発物性科学フロンティアの開拓」が大学活性化制度に採択されました。基礎科学と応用研究の双方にまたがる大きな潮流が芽生えることを期待します。また、九州大学がトップダウンで開始した稲盛フロンティアプログラムについて、第 1 期で採択された教員 5 名のうち 2 名を物理学部門で受け入れることとなりました。当プログラムは世界の第一線で活躍する研究者を招へいするもので、部門のさらなる活性化につながることは間違いありません。その一方で、受け入れ部門の具体的な役割について、プログラム全体として検討する必要が生じた点もあり、プログラムで主体的役割を担っている高等研究院との緊密な話し合いが今後必要になると思われれます。最後は、これも大学のトップダウンで進められようとしている国際卓越研究大学制度への応募です。今回は採択に至りませんでした。学生・教員の全てに対して極めて大きな影響をもたらす話であり、部門としても注視、また積極的に意見を発信する必要があると思われれます。

物理学教室の活動に関する詳しい情報は、ウェブサイト

<https://www.phys.kyushu-u.ac.jp>

にあります。ニュース等は随時更新されていますので、是非御覧ください。今後とも物理学部門をよろしくお願いたします。

令和 5 年度 物理学部門長 緒方一介

目次

はじめに	1
令和5年度の研究・教育活動報告	
素粒子理論	3
理論核物理	26
宇宙物理理論	42
粒子系理論物理学	57
素粒子実験	68
実験核物理	96
粒子系実験	119
物性理論	123
統計物理学	136
凝縮系理論	140
数理物理	144
磁性物理学	147
光物性	152
固体電子物性	156
複雑物性基礎	164
複雑流体	173
複雑生命物性	180
客員教授	190
教職員一覧	191
各種委員一覧	192
物理学教室談話会	193
非常勤講師一覧	195
外国人研究者等受入記録	196
教育課程委員会活動報告	197
物理学部門ファカルティ・ディベロップメント報告	199
入学者数と卒業者数	200
就職・進学状況	201
体験入学・公開講座報告	202
社会貢献活動報告	204

素粒子理論

研究室構成員

鈴木博 教授

津村浩二 准教授

大塚啓 助教

《 博士研究員 》

廣瀬拓哉 (学振 PD 特別研究員) 岡田寛 (学術研究員)

《 大学院 博士課程 》

宮川侑樹 阿部元一 西村皐 宮尾光

《 大学院 修士課程 》

小野田壮真 甲斐貴文 中嶋陽平 内山晴貴

船越秀太 本田大和

《 学部 卒業研究生 》

池部悠介 緒方颯斗 田中峻 平崎騎士

藤澤守遥

《 訪問研究者 》

井上研三

担当授業

量子力学 II (鈴木博)、量子力学 III (鈴木博)、特殊相対論・電気力学 (津村浩二)、解析力学 (津村浩二)、最先端物理学 (津村浩二)、物理学ゼミナール (鈴木博・大塚啓)、物理学特別研究 I・II (鈴木博・津村浩二)、場の量子論 (鈴木博)、M1 ゼミナール (大塚啓)、身の回りの物理学 B (津村浩二)、電磁気学 I・同演習 (水野大介・大塚啓)、物理数学演習 I,II (大塚啓)

研究・教育目標と成果

グラディエントフロー厳密くりこみ群におけるカイラルアノマリー (鈴木博・宮川侑樹) (この研究は園田英徳氏 (神戸大学) との共同研究です。)

Ken Wilson の厳密くりこみ群 (Exact Renormalization Group: ERG) は、連続的場の量子論を非摂動的に定義する基本的な考え方であるが、従来の運動量切断に基づく

ERG は明白なゲージ対称性を壊すという困難がある。グラディエントフロー厳密くりこみ群 (Gradient Flow ERG: GFERG) は、この問題を解決すべく、明白なゲージ対称性を保つ ERG として提案されたものである。ここでは、GFERG の枠組みにおいてカイラルアノマリーの特徴づけを一般的に考察し、それが ERG におけるいわゆる複合演算子 (composite operator) になっていることを示した。これは、カイラルアノマリーがくりこみ群変換のもとできれいなスケールリング則に従うということを言っており、いわゆる 't Hooft アノマリーがくりこみ変換を受けないという性質を GFERG の枠内で表現したものになっていると考えられる。実際、少数の仮定のもとで、いわゆる Adler-Bardeen 定理の対応物が示される。

格子上の 2 次元コンパクトスカラー場理論における磁氣的演算子の構成 (鈴木博・阿部元一・小野田壮真) (この研究は森川億人氏 (大阪大学)、谷崎佑弥氏 (京都大学基礎物理学研究所) との共同研究です。)

近年の一般化された対称性の研究においても、またゲージ理論一般の相構造の研究においても、't Hooft line operator と呼ばれる磁気モノポールの世界線で与えられる演算子は重要な役割を演じる。特に、Witten 効果と呼ばれる、理論にトポロジカル項がある時、モノポールが磁荷と電荷の両方を保つダイオンに変化する現象が基本的である。この Witten 効果を格子ゲージ理論において観測しようと思うと、格子ゲージ理論におけるトポロジカル電荷の定式化、また、磁気モノポールの世界線の定式化の両者が必要となる。しかし、前者は admissibility と呼ばれるある種のなめらかさ条件を要求し、これは Bianchi 恒等式の成立を意味する一方、後者は Bianchi 恒等式の破れとして特徴づけられる。つまり、両者は素朴には両立できないのである。この問題の解決への示唆を得るべく、この研究では、4次元の Abelian ゲージ理論と類似の概念 (トポロジカル電荷や磁氣的物体など) を持ち、より単純な 2次元のコンパクトスカラー場理論を格子上で考え、いかにして、admissibility と Bianchi 恒等式の破れが両立させられるかを議論した。我々の提案は、「穴開け法」(excision method) というもので、格子空間の磁氣的物体の場所に穴を掘り、その内部では admissibility が壊れていることを許すというものである。実際、この方法では、2次元コンパクトスカラー理論での Witten 効果が正しく再現されるなど、非常にうまく行くことを示した。この方法の 4次元ゲージ理論への拡張は今後の課題となっている。

$U(1)$ カイラルアノマリーに付随した非可逆対称性演算子の格子ゲージ理論での構成 (鈴木博・小野田壮真・本田大和) (この研究は森川億人氏 (大阪大学) との共同研究です。) ある対称性がアノマリーを持つ場合、その対称性は壊れている (存在しない) と言われる。ところが近年、Choi-Lam-Shao、また、Córdova-Ohmori により、カイラルフェ

ルミオンの出す $U(1)$ カイラルアノマリーにも関わらず、一般化された対称性の観点からは、特定の回転角のカイラル変換が系の対称性と見なせる可能性が指摘された。ただし、この対称性は、対称性変換が群をなさない、非可逆対称性になっている。これは、アノマリーと対称性の概念に新しい見方を与えるものとして注目される。我々は、この議論を格子ゲージ理論の枠内で理解すべく、上の非可逆対称性の対称性演算子（生成子）を格子上で構成した。これには、格子ゲージ理論におけるカイラルアノマリーの構造の理解が必要で、そのために Ginsparg-Wilson 関係式を満たす格子フェルミオン演算子に基づいた Lüscher の定式化を用いた。また、3次元格子上での位相場の理論（BF 理論）の構成が重要な要素になっている。この格子定式化の応用が現在考察されている。

$U(1)$ ゲージ対称性と入れ替え対称性にもとづく擬南部ゴールドストーンボソン暗黒物質 (津村浩二)

暗黒物質の有力候補として現在盛んに研究されている模型の一つに、擬 Nambu-Goldstone 暗黒物質模型 (pNGB DM 模型) がある。紫外完全な従来の pNGB-DM 模型では崩壊する暗黒物質が予言され、暗黒物質を長寿命にするため、ダークセクターのスケールに大きな階層性を設ける必要があった。我々が提唱した模型では、破れの起源を説明しつつ暗黒物質を安定化することに成功し、大きな階層性を導入せずに済んだ。我々の模型では、理論に新たにダーク $U(1)$ ゲージ対称性を課し、このダーク $U(1)$ に荷電した2個のスカラー場を導入する。さらにこれらのスカラー場には入れ替え対称性を要請する。スカラー場一の線形結合は、入れ替え対称性の下で偶と奇となるものが存在し、奇のものが完全安定となり暗黒物質の候補となる。現在の暗黒物質の残存量も説明できることも確かめ、ダークセクターに階層性を導入することなく、現在の直接検出実験の制限を1ループ補正まで含めても回避できることを示した。

$U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ ゲージ対称なニュートリノ模型への制限 (津村浩二、宮尾光) (この研究は浅井健人氏 (東大宇宙線研), 大川翔平氏 (高エネ研) との共同研究です。)

$U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ ゲージ対称性を持つ模型は、ミューオン $g-2$ の理論値と実験値の乖離を説明でき、さらにニュートリノ質量などへの予言が可能であるため注目されている模型である。まず、我々は標準模型に3世代分の右巻きニュートリノと1つのスカラー粒子を追加し $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ ゲージ対称性を課した最小模型について研究した。その結果、最新のニュートリノ振動のデータとニュートリノ質量和の宇宙論的制限のもとで許される模型が存在することを明らかにした。さらに、この模型に対してこれまで見落とされていた Atomic Parity Violation や Flavor Changing Meson Decay からの制限を考慮することで、 $SU(2)_L$ 二重項スカラーを追加した最小模型が完全に排除されることを確

認した。最後に最小模型に $SU(2)_L$ 一重項スカラーを追加した拡張模型について調べ、新たな制限を交わしつつミューオン $g-2$ を説明できるパラメータ領域を明らかにした。

IIB 型弦理論におけるフレーバー・CP・モジュラー対称性の統一（大塚啓、岡田寛、甲斐貴文）（この研究は石黒奎弥氏（総研大）との共同研究です。）

$T^6/(\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_2)$ 上の IIB 型超弦理論において、フレーバー対称性・CP 対称性・モジュラー対称性が幾何学的に統一されることをはじめて明らかにした。先行研究において、フラックスコンパクト化を考慮すると、トーラスの形を特徴づける複素構造モジュライは固定点に固定されることが統計的に明らかになっていた。そのため、モジュライが固定された弦理論の低エネルギー有効理論において、幾何学的に統一されたフレーバー対称性・CP 対称性・モジュラー対称性のうち特定の離散対称性を分類することが可能になった。今後は、様々なトロイダルオービフォールド模型の有効理論に現れる物質場の対称性を明らかにしていく。

カラビヤウ多様体の特異点で実現される素粒子模型と超対称性の破れ（大塚啓）（この研究は M. Cicoli 氏（Bologna 大学）、A. Cotellucci 氏（Humboldt 大学）との共同研究です。）

本研究では、コンパクトなカラビヤウ多様体の特異点近傍で実現される素粒子模型の現象論研究を遂行した。特に、Large Volume Scenario に基づく超対称性の破れのシナリオにおいて、最小超対称標準模型における真空の安定性を考慮すると、ゲージボソンの超対称パートナーであるゲージノと、クォークの超対称パートナーであるスカラークォークの質量比に十分なスケールの乖離が要求されることを明らかにした。この模型は、インフレーション機構の実現やモジュライ問題の回避などの宇宙論的観測・制限と整合しており、弦理論から現実的な素粒子模型が導かれていることを示唆している。

オートエンコーダに基づく D-brane 模型の解析（大塚啓、西村皐）（この研究は石黒奎弥氏（総研大）との共同研究です。）

IIA 型超弦理論における D6-ブレーンを用いた模型構築、約 1,340 億もの 4 次元有効理論を導くことが知られていたが、この膨大な数の弦理論の真空構造は明らかにされていなかった。そこで、機械学習の一つであるオートエンコーダを用いて、IIA 型超弦理論の D-brane 模型の持つ隠れた構造を調べた。オートエンコーダを構成するニューラルネットワークの中間層では、クォークとレプトンの世代が統一されている模型がクラスター化することを示した。そして、世代が統一されているクラスターでは、隠れたセクターの D6 ブレーンの電荷が特徴量である。今後は、現実的な素粒子模型におい

て、D6 ブレーン電荷に注目した解析を発展させていきたい。

カラビヤウコンパクト化におけるモジュラー形式と階層的な湯川結合（大塚啓、西村 皐）（この研究は小林達夫氏（北海道大学）、石黒奎弥氏（総研大）との共同研究です。）カラビヤウ多様体上にコンパクト化されたヘテロ型弦理論において、物質場の湯川結合を解析した。本研究で初めて、カラビヤウ多様体のモジュライ空間の境界において実現される $SL(2, \mathbb{Z})$ のみならずその部分群である $\Gamma_0(N)$ 対称性のもとで、物質場およびその湯川結合が非自明な変換することを明らかにした。このモジュラー形式で記述される湯川結合は階層的な構造をもち、クォーク・レプトンの階層的な質量構造を導くことが期待される。

強化学習を用いた Froggatt-Nielsen 模型のフレーバー構造探索（大塚啓、西村 皐、宮尾光）

Froggatt-Nielsen(FN) 模型では標準模型に新たな $U(1)$ 対称性を課し、各粒子の $U(1)$ 電荷の値によって素粒子の質量階層性および混合角が導かれる。電荷の組は、全粒子の電荷を $[-9, 9]$ の範囲に限定しても約 10^{24} 通り存在し、逐次検証は不可能である。FN 模型におけるクォークセクターに限定したフレーバー構造に対して機械学習の一種「強化学習」を適用した先行研究では、同セクターの質量・混合角を再現する $U(1)$ 電荷が発見されていた。本研究ではこれを拡張し、いまだ未解明のニュートリノのフレーバー構造や、現在の加速器実験で注目されているレプトンセクターまでを含む強化学習の応用を実施した。学習の結果、クォーク・レプトン両者の質量・混合角が共に実験値と整合するような $U(1)$ 電荷の配位が、効率よく見出された。また実験値の再現に留まらず、ニュートリノの質量構造として逆階層より順階層が好ましいことを統計的に示し、二重ベータ崩壊探索でも検証が見込まれるニュートリノの有効質量を提案した。

トロイダルオービフォールドの複素構造モジュライにおける $SL(2, \mathbb{Z})$ 対称性の破れ（大塚啓、甲斐貴文）（この研究は小林達夫氏（北海道大学）、石黒奎弥氏（総研大）との共同研究です。）

本研究では、タイプ IIB 超弦理論における T^6/\mathbb{Z}_{6-II} および $T^6/(\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_4)$ オリエンティフォールドに関する解析を行った。トーラス上の複素構造モジュライは $SL(2, \mathbb{Z})$ 対称性を持つことが知られており、 $T^6/(\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_4)$ オリエンティフォールドにおいても複素構造モジュライは $SL(2, \mathbb{Z})$ 対称性を持つことが明らかになった。しかし、 T^6/\mathbb{Z}_{6-II} オリエンティフォールド上では複素構造モジュライの持つ対称性は $SL(2, \mathbb{Z})$ とはならず、その合同部分群である $\Gamma_0(3)$ とモジュライの楕円変換に対応する外部自己同型群 $S_{(3)}$ の外部半直積 $\Gamma_0(3) \rtimes S_{(3)}$ であることを明らかにした。さらに、この複素構造モジュライ

が持つ対称性を用いてタイプ IIB 超弦理論のフラックスランドスケープについても解析した。 $T^6/(\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_2)$ の場合について解析した先行研究において、複素構造モジュライの持つ対称性が $SL(2, \mathbb{Z})$ であることから、モジュライ場の真空期待値は $SL(2, \mathbb{Z})$ 変換の固定点の値をとる確率が統計的に高いことが知られていた。本研究では、複素構造モジュライの持つ対称性が $\Gamma_0(3) \times S_{(3)}$ である場合でも、モジュライ場の真空期待値はその対称性に関する固定点の値をとる確率が統計的に高いことを明らかにした。

質量殻外暗黒ヒッグスの崩壊でできる暗黒光子の FASER における探索 (中嶋陽平) (この研究は荒木威氏 (奥羽大)、浅井健人氏 (東大宇宙線研)、下村崇氏 (宮崎大) との共同研究です。)

質量が数 GeV 以下の暗黒物質の候補は、暗黒物質の残存量を説明するために暗黒物質と標準模型の粒子の相互作用を媒介する質量が数 GeV 以下の粒子を必要とする。そのような媒介粒子の例として、暗黒光子と暗黒ヒッグスがある。先行研究では、暗黒光子の質量起源としての質量殻内暗黒ヒッグスの崩壊でできる暗黒光子への FASER の感度を調べていた。我々は、それを暗黒光子の質量殻外暗黒ヒッグスの場合に拡張した。これにより、FASER の暗黒光子、暗黒ヒッグスへの感度領域が広がった。また、暗黒光子と暗黒ヒッグスを含む系において摂動計算が有効であるパラメーター領域を明らかにした。

発表論文

《原著論文》

Topology of $SU(N)$ lattice gauge theories coupled with \mathbb{Z}_N 2-form gauge fields:

Motokazu Abe, Okuto Morikawa, Soma Onoda, Hiroshi Suzuki, and Yuya Tanizaki,

Journal of High Energy Physics **08** (2023), 118

[arXiv:2303.10977 [hep-lat]]

Chiral anomaly as a composite operator in the gradient flow exact renormalization group formalism:

Yuki Miyakawa, Hidenori Sonoda, and Hiroshi Suzuki,

Progress of Theoretical and Experimental Physics **2023** (2023) 6, 063B03

[arXiv:2304.14753 [hep-th]]

Magnetic operators in 2D compact scalar field theories on the lattice,
Motokazu Abe, Okuto Morikawa, Soma Onoda, Hiroshi Suzuki, Yuya Tanizaki,
Progress of Theoretical and Experimental Physics **2023** (2023) 7, 063B03
[arXiv:2304.14815 [hep-lat]]

Lattice realization of the axial $U(1)$ noninvertible symmetry:
Yamato Honda, Okuto Morikawa, Soma Onoda, Hiroshi Suzuki,
Progress of Theoretical and Experimental Physics **2024** (2024) 4, 043B04
[arXiv:2401.01331 [hep-lat]]

A model of pseudo-Nambu-Goldstone dark matter with two complex scalars:
Tomohiro Abe, Yu Hamada, Koji Tsumura,
Journal of High Energy Physics **04** (2024), 076
[arXiv:2401.02397 [hep-ph]]

Pseudo-Nambu-Goldstone Dark Matter in $SU(7)$ Grand Unification:
Cheng-Wei Chiang, Koji Tsumura, Yoshiki Uchida, Naoki Yamatsu,
Physical Review **D109**, 055040 (2024)
[arXiv:2311.13753 [hep-ph]]

Exploring the flavor structure of quarks and leptons with reinforcement learning:
Satsuki Nishimura, Coh Miyao, and Hajime Otsuka,
Journal of High Energy Physics **12** (2023), 021
[arXiv:2304.14176 [hep-ph]]

Flavor, CP and metaplectic modular symmetries in Type IIB chiral flux vacua:
Keiya Ishiguro, Takafumi Kai, Hiroshi Okada and Hajime Otsuka,
Journal of High Energy Physics **12** (2023), 136
[arXiv:2305.19155 [hep-th]]

Upper bound on the Atiyah-Singer index from tadpole cancellation:
Keiya Ishiguro, Takafumi Kai, Satsuki Nishimura, Hajime Otsuka, and Maki Takeuchi,
Journal of High Energy Physics **01** (2024), 200
[arXiv:2308.12421 [hep-th]]

Sequestered string models imply split supersymmetry:

Michele Cicoli, Alessandro Cotellucci and Hajime Otsuka,

Journal of High Energy Physics **01**, 059 (2024)

[arXiv:2309.05752 [hep-th]]

Texture zeros realization in a three-loop radiative neutrino mass model from modular A_4 symmetry:

Takaaki Nomura, Hiroshi Okada and Hajime Otsuka,

Nucl. Phys. B **1004**, 116579 (2024)

[arXiv:2309.13921 [hep-ph]]

Modular flavor models with positive modular weights: a new lepton model building:

Tatsuo Kobayashi, Takaaki Nomura, Hiroshi Okada and Hajime Otsuka,

Journal of High Energy Physics **01**, 121 (2024)

[arXiv:2310.10091 [hep-ph]]

Electroweak phase transition with radiative symmetry breaking in a type-II seesaw model with an inert doublet:

Shilpa Jangid and Hiroshi Okada,

Phys. Rev. D **01**, 109 (2024)

[arXiv:2310.12591 [hep-ph]]

Neutrino mass model and dark matter with $Y=0$ inert triplet scalar:

Shilpa Jangid, Keiko I. Nagao, and Hiroshi Okada,

Physics Letters B **858**, 139030 (2024)

[arXiv:2311.08901 [hep-ph]]

Flux Landscape with enhanced symmetry not on $SL(2, \mathbb{Z})$ elliptic points:

Keiya Ishiguro, Takafumi Kai, Tatsuo Kobayashi and Hajime Otsuka,

Journal of High Energy Physics **02**, 099 (2024)

[arXiv:2311.12425 [hep-th]]

Autoencoder-driven clustering of intersecting D-brane models via tadpole charge:

Keiya Ishiguro, Satsuki Nishimura and Hajime Otsuka,

Journal of High Energy Physics **08**, 133 (2024)

[arXiv:2312.07181 [hep-th]]

Modular forms and hierarchical Yukawa couplings in heterotic Calabi-Yau compactifications:

Keiya Ishiguro, Tatsuo Kobayashi, Satsuki Nishimura and Hajime Otsuka,
Journal of High Energy Physics **08**, 088 (2024)

[arXiv:2402.13563 [hep-th]]

Induced moduli oscillation by radiation and space expansion in a higher-dimensional model:

Hajime Otsuka and Yutaka Sakamura,
Phys. Rev. D **109**, no.11, 115019 (2024)

[arXiv:2402.15547 [hep-th]]

Nambu-Goldstone Modes in Magnetized T^{2n} Extra Dimensions:

Takuya Hirose, Hajime Otsuka, Koji Tsumura, Yoshiki Uchida,
Phys. Rev. D **110**, no.3, 035032 (2024)

[arXiv:2403.16801 [hep-th]]

Note on lattice description of generalized symmetries in $SU(N)/\mathbb{Z}_N$ gauge theories:

Motokazu Abe, Okuto Morikawa, Soma Onoda

Phys. Rev. D **108**, no.1, 014506 (2023)

[arXiv:2304.11813 [hep-th]]

⟨⟨Proceedings⟩⟩

Lattice construction of mixed 't Hooft anomaly with higher-form symmetry:

Motokazu Abe, Okuto Morikawa, Soma Onoda, Hiroshi Suzuki, Yuya Tanizaki,

Contribution to Lattice 2023, [arXiv:2401.00495 [hep-lat]]

Higher-group symmetry in lattice gauge theories with restricted topological sectors:

Motokazu Abe, Naoto Kan, Okuto Morikawa, Yuta Nagoya, Soma Onoda, Hiroki Wada,

Contribution to Lattice 2023, [arXiv:2310.01787 [hep-lat]]

《その他の論文》

Yet another lattice formulation of 2D $U(1)$ chiral gauge theory via bosonization:

Okuto Morikawa, Soma Onoda, Hiroshi Suzuki,

[arXiv:2403.03420 [hep-lat]]

Action of the axial $U(1)$ non-invertible symmetry on the 't Hooft line operator: A lattice gauge theory study:

Yamato Honda, Soma Onoda, Hiroshi Suzuki,

[arXiv:2403.16752 [hep-lat]]

Electroweak Symmetry Breaking in Two Higgs Doublet Model from 6D Gauge-Higgs Unification on T^2/Z_2 :

Kento Akamatsu, Takuya Hirose, Nobuhito Maru, Akio Nago,

[arXiv:2312.08608 [hep-ph]]

New Constraints on Gauged $U(1)_L \mu - L \tau$ Models via $Z - Z'$ Mixing:

Kento Asai, Coh Miyao, Shohei Okawa, Koji Tsumura,

[arXiv:2401.17613 [hep-ph]]

著書

なし

講演

《海外での講演》

Upper bound on the Atiyah-Singer index from tadpole cancellation:

Hajime Otsuka,

Parallel talk at the international workshop, "String phenomenology 2023"、2023年7月4日、IBS、Daejeon、Korea

Scalar dark matter with a $\mu\tau$ flavored mediator

Coh Miyao,

27th International Summer Institute on Phenomenology of Elementary Particle Physics

and Cosmology, 2023/8/23rd, Sun-Link-Sea hotel, Taiwan

Relation between higher-dimensional gauge theories and gravitational waves from first-order phase transitions

Takuya Hirose,

27th International Summer Institute on Phenomenology of Elementary Particle Physics and Cosmology, 2023/8/24th, Sun-Link-Sea hotel, Taiwan

Lattice construction of mixed 't Hooft anomaly with higher form symmetry

Motokazu Abe

The International Symposium on Lattice Field Theory, 2023/7/31, FermiLab, Chicago, America

Flavor, CP and Metaplectic Modular Symmetries in Type IIB Chiral Flux Vacua

Takafumi Kai,

Parallel talk at the international workshop, "String phenomenology 2023"、2023年7月6日、IBS、Daejeon、Korea

《国内での講演》

Gradient flow exact renormalization group: Illustration in the gauged NJL model

Hiroshi Suzuki

KEK Theory Workshop 2023, 招待講演、2023年12月1日、高エネルギー加速器研究機構

藤原さんと格子上のカイラルアノマリー

鈴木博

茨大素粒子 Mini Workshop、2024年3月29日、茨城大学

Lattice realization of the axial $U(1)$ non-invertible symmetry

鈴木博

駒場研究会 場の理論への非摂動的アプローチ、2024年3月31日、東京大学駒場キャンパス

The origin of pseudo-Nambu-Goldstone-Boson Dark Matter

Koji Tsumura

Hokkaido Workshop on Particle Physics at Crossroads, 招待講演, 7-10 Mar 2024,
Hokkaido University, Sapporo, Japan

安定な擬南部ゴールドストーン暗黒物質の起源

津村浩二

第129回日本物理学会九州支部例会, 2023年12月2日, 長崎大学

Upper bound on the Atiyah-Singer index from tadpole cancellation

大塚啓

場の理論と弦理論 2023, 2023年8月20日, 京都大学基礎物理学研究所

Open challenges for string phenomenology

大塚啓

Particle Physics and Cosmology from String Compactification, 2023年9月5日, 北海道大学

Upper bound on the Atiyah-Singer index from tadpole cancellation

大塚啓

日本物理学会第78回年次大会, 2023年9月18日, 東北大学青葉山キャンパス

Flavor, CP and Modular Symmetries from the top down and the bottom up

Hajime Otsuka

KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2023), 招待講演,
2023年11月10日, 高エネルギー加速器研究機構

Sequestered String Models imply Split Supersymmetry

Hajime Otsuka

KEK Theory Workshop 2023, 2023年11月30日, 高エネルギー加速器研究機構

Sequestered String Models imply Split Supersymmetry

大塚啓

第129回日本物理学会九州支部例会, 2023年12月2日, 長崎大学

Modular forms and hierarchical Yukawa couplings in heterotic Calabi-Yau compactifi-

cations

大塚啓

“Particle Physics and Cosmology from String Compactification” 2nd meeting、2024年
2月27日、早稲田大学

Sequestered String Models imply Split Supersymmetry

大塚啓

日本物理学会 2024年春季大会、2024年3月19日、オンライン

Exploring the flavor structure of quarks and leptons with reinforcement learning

Satsuki Nishimura

34th IUPAP Conference on Computational Physics 2023、2023年8月7日、オンライ
ン

機械学習で探るクォーク・レプトンのフレーバー構造

西村皐

原子核三者若手 夏の学校 2023、2023年8月19日、国立オリンピック記念青少年総合
センター

強化学習を用いた Froggatt-Nielsen 模型のフレーバー構造探索

西村皐

素粒子物理学の進展 2023、2023年8月30日、京都大学基礎物理学研究所

強化学習を用いた Froggatt-Nielsen 模型のフレーバー構造探索

西村皐

Particle Physics and Cosmology from String Compactification、2023年9月5日、北海
道大学

強化学習を用いた Froggatt-Nielsen 模型のフレーバー構造探索

西村皐

日本物理学会 第78回年次大会、2023年9月16日、東北大学

機械学習で探るクォーク・レプトンのフレーバー構造

西村皐

瀬戸内サマーインスティテュート 2023、2023年9月22日、広島大学

Exploring the flavor structure of quarks and leptons with reinforcement learning
西村 皐

学習物理学 R5 年度領域会議、2023 年 9 月 27 日、東京大学

AI × 物理学で紡ぐ研究最前線

西村 皐

佐世保北高等学校 ポラリスデイ、アウトリーチ依頼講演、2023 年 10 月 25 日、佐世保北高等学校

Exploring the flavor structure of quarks and leptons with reinforcement learning
Satsuki Nishimura

KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2023)、2023 年 11 月 8 日、高エネルギー加速器研究機構

Exploring the flavor structure of quarks and leptons with reinforcement learning
Satsuki Nishimura

International conference on MACHINE LEARNING PHYSICS、2023 年 11 月 13 日、京都大学基礎物理学研究所

機械学習を用いた Froggatt-Nielsen 模型のフレーバー構造探索

西村 皐

Flavor Physics Workshop 2023、2023 年 11 月 24 日、伊豆山温泉ハートピア熱海

Exploring the flavor structure of quarks and leptons with reinforcement learning
西村 皐

名古屋大学 E 研セミナー、2023 年 11 月 28 日、名古屋大学

強化学習によるモジュラーフレーバー模型の解析

西村 皐

第 129 回日本物理学会九州支部例会、2023 年 12 月 2 日、長崎大学

Machine Learning for the Flavor Structures of Quarks and Leptons

西村 皐

KEK-NAOJ Student Workshop 2023、2023 年 12 月 16 日、オンライン

機械学習で探るクォーク・レプトンの量子構造

西村 皐

九州大学 量子ネイティブ育成 研究シンポジウム、2024年1月16日、九州大学

Exploring the flavor structure of quarks and leptons with reinforcement learning

Satsuki Nishimura

The 6th R-CCS International Symposium、2024年1月29日、神戸国際会議場

機械学習を用いたクォーク・レプトンのフレーバー構造探索

西村 皐

素核宇学生セミナー 2024、2024年2月24日、オンライン

強化学習によるモジュラーフレーバーモデルの解析

西村 皐

“Particle Physics and Cosmology from String Compactification” 2nd meeting、2024年2月26日、早稲田大学

Scalar Dark Matter with a $\mu\tau$ Flavored Mediator

宮尾 光

HPNP2023 - The 6th International Workshop on “Higgs as a Probe of New Physics 2023”、2023年6月6日、大阪大学

許されるニュートリノ質量行列構造を実現するフレーバーモデル

宮尾 光

原子核三者若手 夏の学校 2023、2023年8月20日、国立オリンピック記念青少年総合センター

Classification of flavor models with two zero texture (minor) neutrino mass matrix

宮尾 光

素粒子物理学の進展 2023、2023年8月29日、京都大学基礎物理学研究所

レプトンフレーバー対称性に基づくニュートリノモデルの質量行列構造に注目した分類と解析

宮尾 光

日本物理学会 第 78 回年次大会、2023 年 9 月 19 日、東北大学

Neutrino models based on the $U(1)_{\mu-\tau}$ gauge symmetry

宮尾光

KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2023)、2023 年 11 月 7 日、高エネルギー加速器研究機構

レプトンフレーバー対称性に基づくニュートリノ模型

宮尾光

Flavor Physics Workshop 2023、2023 年 11 月 24 日、伊豆山温泉ハートピア熱海

レプトンフレーバー対称性に基づくニュートリノ模型

宮尾光

第 129 回日本物理学会九州支部例会、2023 年 12 月 2 日、長崎大学

$U(1)_{\mu-\tau}$ 対称性に基づくニュートリノ模型への新しい制限

宮尾光

量子ネイティブ育成研究シンポジウム、2024 年 1 月 15 日、九州大学

New Constraints on Gauged $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ Models via $Z - Z'$ Mixing

宮尾光

新 Higgs 勉強会第 37 回定例会、2024 年 1 月 20 日、大阪大学

格子上における分数トポロジカル電荷の数値計算

阿部元一

計算物理 春の学校 2024, 2024 年 3 月 11 日, 沖縄

格子ゲージ理論における一般化された対称性

阿部元一

九州大学量子ネイティブ育成研究シンポジウム, 2024 年 1 月 16 日, 福岡

Lattice construction of mixed 't Hooft anomaly with \mathbb{Z}_N 1-form symmetry and θ periodicity

阿部元一

The 18th Kavli Asian Winter School on Strings, Particles and Cosmology, 2023 年 12

月 5 日, 京都大学基礎科学研究所

Fractional topological charge in lattice non-Abelian gauge theory

阿部元一

KEK Theory Workshop, 2023 年 11 月 29 日, KEK

Lattice construction of 't Hooft anomaly with \mathbb{Z}_N 1-form symmetry

阿部元一

大阪大学素粒子理論グループ セミナー, 2023 年 11 月 21 日, 大阪大学

4次元格子 SU(N) ゲージ理論における分数トポロジカル電荷

阿部元一

日本物理学会 第 78 回年次大会, 2023 年 9 月 16 日, 東北大学

\mathbb{Z}_N 1-form 対称性に付随する 't Hooft アノマリーの格子定式化

阿部元一

熱場の量子論とその応用, 2023 年 8 月 28 日, 高エネルギー加速器研究機構 3 号館 1 階
セミナーホール

SU(N) ゲージ理論での \mathbb{Z}_N 1-form ゲージ対称性と時間反転対称性の間の混合 't Hooft
アノマリーの格子定式化

阿部元一

原子核三者夏の学校 2023, 2023 年 8 月 17 日, 国立オリンピック記念青少年総合センター,
東京都

Topology of SU(N) lattice gauge theories coupled with \mathbb{Z}_N 2-form gauge fields

阿部元一

場の理論と弦理論 2023, 2023 年 8 月 4 日, オンライン

Relation between higher-dimensional gauge theories and gravitational waves from first-
order phase transitions

廣瀬拓哉

HPNP2023 - The 6th International Workshop on "Higgs as a Probe of New Physics
2023", 2023 年 6 月 6 日, 大阪大学

フラックスコンパクト化におけるスカラー場の有限な質量補正とインフレーションへの応用

廣瀬拓哉

Particle Physics and Cosmology from String Compactification, 2023年9月6日、北海道大学

Relation between higher-dimensional gauge theories and gravitational waves from first-order phase transitions

廣瀬拓哉

日本物理学会 第78回年次大会, 2023年9月19日、東北大学

Relation between higher-dimensional gauge theories and gravitational waves from first-order phase transitions

廣瀬拓哉

Gravitational Wave Probes of Physics Beyond Standard Model, 2023年11月6日、大阪公立大学

Relation between higher-dimensional gauge theories and gravitational waves from first-order phase transitions

廣瀬拓哉

第129回日本物理学会九州支部例会, 2023年12月2日、長崎大学

Eclectic Flavor Symmetry in Type IIB String Landscape

甲斐貴文

場の理論と弦理論 2023, 2023年8月4日, オンライン

タイプ IIB 超弦理論の真空構造におけるエクレクティックフレーバー対称性

甲斐貴文

原子核三者夏の学校 2023, 2023年8月20日, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 東京都

Distributions of Three Generation Models in Type IIB Chiral Flux Vacua

甲斐貴文

素粒子物理学の進展 2023, 2023年8月29日, 京都大学基礎物理学研究所

Flavor, CP and Metaplectic Modular Symmetries in Type IIB Chiral Flux Vacua
甲斐貴文

Particle Physics and Cosmology from String Compactification, 2023年9月5日, 北海道大学

Flavor, CP and Metaplectic Modular Symmetries in Type IIB Chiral Flux Vacua
甲斐貴文

日本物理学会第78回年次大会, 2023年9月18日, 東北大学青葉山キャンパス

Flavor, CP and Metaplectic Modular Symmetries in Type IIB Chiral Flux Vacua
Takafumi Kai

KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2023), 2023年11月10日, 高エネルギー加速器研究機構

Eclectic Flavor Symmetry in Type IIB String Landscape
Takafumi Kai

KEK Theory Workshop 2023, 2023年11月29日, 高エネルギー加速器研究機構

Distributions of Three Generation Models in Type IIB Chiral Flux Vacua
甲斐貴文

第129回日本物理学会九州支部例会, 2023年12月2日, 長崎大学

トロイダルオービフォールドにおける $SL(2, \mathbb{Z})$ 対称性の破れとその分類
甲斐貴文

“Particle Physics and Cosmology from String Compactification” 2nd meeting, 2024年2月28日, 早稲田大学

Flux Landscape with Enhanced Symmetry Not on $SL(2, \mathbb{Z})$ Elliptic Points
甲斐貴文

日本物理学会2024年春季大会, 2024年3月19日, オンライン

中間子崩壊による暗黒光子生成へのオフシェル暗黒ヒッグス粒子の寄与とFASERでの検出可能性

中嶋陽平

原子核三者夏の学校2023, 2023年8月20日, 国立オリンピック記念青少年総合センター,

東京都

中間子崩壊による暗黒光子生成への off shell 暗黒ヒッグス粒子の寄与

中嶋陽平

日本物理学会第 78 回年次大会, 2023 年 9 月 18 日, 東北大学青葉山キャンパス

中間子崩壊による暗黒光子生成へのオフシェル暗黒ヒッグス粒子の寄与

中嶋陽平

第 129 回日本物理学会九州支部例会, 2023 年 12 月 2 日, 長崎大学

Lattice realization of the axial $U(1)$ non-invertible symmetry

本田大和

日本物理学会 2024 年春季大会, 2024 年 3 月 19 日, オンライン

Magnetic operators in 2D compact scalar field theories on the lattice

小野田壮真

場の理論と弦理論 2023, 2023 年 8 月 4 日, オンライン

格子上の 2 次元コンパクトスカラー理論における磁氣的演算子の構成

小野田壮真

原子核三者夏の学校 2023, 2023 年 8 月 17 日, 国立オリンピック記念青少年総合センター,
東京都

格子上の 2 次元コンパクトスカラー理論における磁氣的演算子の構成

小野田壮真

熱場の量子論とその応用, 2023 年 8 月 29 日, 高エネルギー加速器研究機構 3 号館 1 階
セミナーホール

格子上の 2 次元コンパクトスカラー理論における磁氣的演算子の構成

小野田壮真

日本物理学会 第 78 回年次大会, 2023 年 9 月 16 日, 東北大学

格子上の 2 次元コンパクトスカラー理論における磁氣的演算子の構成

小野田壮真

瀬戸内サマーインスティテュート 2023, 2023 年 9 月 19 日, 広島大学

格子正則化された2次元コンパクトスカラー理論における磁氣的演算子の定式化
小野田壮真

第129回日本物理学会九州支部例会, 2023年12月2日, 長崎大学

格子上の4次元Maxwell理論における't Hooft lineの構成
小野田壮真

日本物理学会2024年春季大会, 2024年3月19日, オンライン

外部資金

《文部科学省科学研究費補助金》

科学研究費補助金、基盤研究(C)

ゲージ対称性を明白に保つ厳密くりこみ群の構築とその応用

研究代表者：鈴木博

科学研究費補助金、新学術領域研究(計画研究)

標準理論を超えた新現象とニュートリノで探る新しい素粒子像

研究代表者：津村浩二

科学研究費補助金、基盤研究(C)

拡張有効理論で迫るヒッグスセクターの新原理

研究代表者：津村浩二

科学研究費補助金、若手研究

オービフォールド特異点の解消とその現象論的応用

研究代表者：大塚啓

科学研究費補助金、学術変革領域研究(A)

機械学習を用いた弦の有効理論の構築

研究代表者：大塚啓

《文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金》

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

なし

他大学での研究と教育

学部4年生卒業研究

池部悠介：(指導教員、鈴木博・津村浩二)：場の量子論

緒方颯斗：(指導教員、鈴木博・津村浩二)：場の量子論

田中峻：(指導教員、津村浩二)：場の量子論

平崎騎士：(指導教員、鈴木博・津村浩二)：場の量子論

藤澤守遥：(指導教員、鈴木博・津村浩二)：場の量子論

修士論文

小野田壮真：(指導教員、鈴木博)：格子ゲージ理論における磁氣的物体の構成

甲斐貴文：(指導教員、大塚啓)：トロイダルオービフォルド上の超弦理論におけるモジュライ場の真空構造の解明

中嶋陽平：(指導教員、津村浩二)：質量殻外暗黒ヒッグスの寄与による暗黒光子生成のFASERにおける探索

博士論文

なし

外国人留学生の受け入れ

なし

学外での学会活動

鈴木博：

理化学研究所数理創造プログラム (iTHEMS) 客員研究員

Progress of Theoretical and Experimental Physics 編集委員

津村浩二：

京都大学 基礎物理学研究所 共同利用委員会 議長団 (代表)

高エネルギー物理学研究者会議 将来計画検討委員会委員

ILC-Japan Physics Working Group

受託研究・民間との共同研究

なし

その他の活動と成果

阿部元一：

「日本物理学会 第78回年次大会」にて学生優秀発表賞を受賞

西村皐：

「原子核三者若手 夏の学校 2023」にて優秀発表賞を受賞

「日本物理学会 第78回年次大会」にて学生優秀発表賞を受賞

「Flavor Physics Workshop 2023」にてベストトーク賞を受賞

「素核宇学生セミナー 2024」にて優秀賞を受賞

理論核物理

研究室構成員

緒方 一介 教授

湊 太志 准教授

小川 翔也 (特定プロジェクト) 助教

《 大学院 博士課程 》

金 龍熙 中田 響 (指導委託学生)

《 大学院 修士課程 》

松川 怜史 木田 浩樹

《 学部 卒業研究生 》

宇都宮 颯斗 宇山 純一 武智 雄大 伊達 創希

田中 峻

担当授業

現代物理学基礎 (基幹教育科目, 化学科 2 年, 緒方一介), 電磁気学概論 (農学部 1 年, 緒方一介), 熱力学概論 (農学部 1 年, 緒方一介), 物理学入門 IIA (緒方一介), 物理学特別研究 I (緒方一介), 物理学特別研究 II (緒方一介) 数値計算法 A・B (湊太志), 最先端物理学 A (湊太志), 物理学特別研究 I (湊太志), 物理学特別研究 II (湊太志), 物理学総合演習 (小川翔也)

研究・教育目標と成果

ノックアウト反応を利用した不安定核の一粒子構造の研究

(S. Chen [香港大], H. Wang [理研], B. D. Linh [VARANS], 吉田数貴 [JAEA], 緒方一介ほか)

原子核の基本的な捉え方として、構成核子が原子中の電子のように一粒子軌道を“運動”するという、いわゆる独立粒子描像がある。その帰結として、希ガス原子と同様に、核子数が特定の値をもつとき、原子核は著しく安定化する。その特別な数を魔法数とよぶ。永らく普遍的であると考えられてきた魔法数であるが、近年、陽子数と中性子数のバランスが崩れた不安定核では変化することが確かめられ、大きな話題となっている。原子核の魔法数を解明する手段として、核子ノックアウト反応があり、理化

学研究所の実験施設 RI ビームファクトリー (RIBF) で精力的な測定がなされている。今年度は、 $^{56,58}\text{Ca}$, ^{28}Ne , ^{49}Ar の原子核について、その一粒子構造と魔法性について研究を行った。また ^{49}Ar については、集団運動の発露が実験的に示唆された。本研究は RIBF の国際共同研究グループによって進められ、その成果は学術誌 *Physics Letters B* ならびに *Physical Review C* に掲載された。

非束縛原子核 ^{28}O の観測

(近藤洋介 [東工大]、緒方一介ほか)

近年、陽子・中性子数の束縛限界を超えた“原子核”の研究が精力的に進められている。これらの原子核は強い相互作用に対して不安定であるが、共鳴状態としてごく短時間存在することが知られている。そのような原子核の中で ^{28}O は、現在の加速器で探索可能な最後の二重魔法核の候補であった。本研究では、 ^{29}F 原子核から 1 つの陽子を叩き出す反応を RIBF で実施・測定し、世界で初めて ^{28}O 原子核の観測に成功した。また、生成断面積の詳細な分析により、この ^{28}O 原子核は二重魔法性を有しないことを明らかにした。本研究は東京工業大学の近藤洋介助教を中心とする国際共同研究グループによって実施され、その成果は学術誌 *Nature* に掲載された。

アルファノックアウト反応で発現する原子核の有効偏極

(枝川知温 [阪大 RCNP]、吉田数貴 [JAEA]、茶園亮樹 [理研]、緒方一介)

原子核内に存在するアルファクラスター (原子核の中で固く束縛している ^4He 原子核) の実証研究が系統的に進められている。その際用いられているのが、陽子を原子核に入射し、アルファ粒子を叩き出す反応である。先行研究により、この反応は空間的選択性が強く、原子核の一部だけを“見て”いることが示唆されている。本研究では、この特性を活用するべく、残留原子核が有限のスピンをもつ状況を考え、分析を行った。その結果、反応領域の強い選択則のため、残留原子核のスピンの向きが著しく偏ることを明らかにした。本研究は大阪大学核物理研究センター (RCNP) の枝川氏を中心に進められ、その成果は学術誌 *Physical Review C* に掲載された。

^{10}Be 原子核のクラスター構造の実証

(P. J. Li [香港大]、D. Beaumel [IPN オルセー]、吉田数貴 [JAEA]、緒方一介ほか)

^{10}Be 原子核は、基底状態が発達したアルファクラスター構造をもつ原子核として知られている。しかしその実験的実証はこれまででなされてこなかった。本研究では、不安定核 (ベータ崩壊に対して不安定な核) である ^{10}Be を液体水素標的に入射し、アルファ粒子が叩き出される反応を測定し、理論計算との比較から、 ^{10}Be がクラスター構造をもつことを直接実証することに成功した。本研究は香港大学の Li 氏を中心に進められ、

その成果は学術誌 Physical Review Letters に掲載された。

ノックアウト反応断面積に対する吸収効果の系統的研究

(Sang-In Shim[阪大 RCNP]、吉田数貴 [JAEA]、緒方一介)

近年、原子核の一粒子構造やクラスター構造を解明するべく、陽子を入射粒子とするノックアウト反応の実験が盛んに実施また計画されている。この実験の立案にあたっては、反応の断面積 (イベント数) の算定が本質的に重要である。ノックアウト反応の断面積は、原子核による吸収がなければ、入射粒子と叩き出される粒子との全断面積で見積もることができる。したがって、実際のイベント数を見積もるための鍵は、原子核による吸収の大きさの系統的理解である。そこで本研究では、いくつかのエネルギーにおいて、陽子ならびにアルファ粒子を叩き出す反応の吸収の強さを、標的原子核の質量数 A の関数として表現した。実際、この成果は阪大 RCNP のリングサイクロトロンの実験計画を立案する際に活用されている。本研究は阪大 RCNP 究センターの Shim 氏を中心に進められ、その成果は学術誌 Journal of Physical Society of Japan に掲載された。

ノックアウト反应用標準計算コードの公開

(緒方一介、吉田数貴 [JAEA]、茶園亮樹 [理研])

歪曲波インパルス近似 (DWIA) を用いてノックアウト反応の断面積を計算するプログラム PIKOE を公開した。PIKOE の最大の特徴は、順運動学 (構造を知りたい原子核を標的核とする場合) だけでなく、逆運動学 (構造を知りたい原子核が入射粒子となる場合) の計算が直接可能である点である。近年、不安定核に対するノックアウト反応の精力的な測定が進められており、逆運動学において角度等の指定がなされることが多い。そのような条件の指定が可能な PIKOE は、実験の立案や解析に広く用いられると期待される。本研究は緒方氏を中心に進められ、学術誌 Computational Physics Communications に掲載された。

微視的モデルを用いたミューオン捕獲反応に対するメソン交換流の影響

(湊太志、内藤智也 [RIKEN])

二次宇宙線として地上に絶え間なく降り注ぐミューオンが、近年半導体のソフトウェアを引き起こす要因の一つとして着目を浴びている。この現象は、原子核によって原子軌道に束縛されたミューオンが捕獲され (弱い相互作用)、高い励起状態になった原子核が荷電粒子を放出することによって起きている。荷電粒子は、半導体内で異常電圧を引き起こすため、ソフトウェアが発生する。この問題の解決には、原子核物理のモデルを利用した荷電粒子のスペクトル予測が必要になってくる。しかし、これま

で我々が行ってきた研究により、荷電粒子のスペクトルを正確に予測するためには、メソン交換流の影響を正確に取り入れなくてはならないことが分かってきた。

これまで多くの先行研究では、メソン交換流の影響は現象論的なモデルで影響が予測されていた。我々は乱雑位相近似法を用いてその効果を微視的に調べ、精度の高い荷電粒子スペクトルの予測を目指している。これまでにその計算の準備を行うためにメソン交換流のような二体の外場を取り扱うことができる第2乱雑位相近似法の計算コードの開発を行ってきた。今後は、開発した計算コードを用いてメソン交換流の影響を調べていく予定である。

中性子誘起核分裂の核分裂収率の理論的予測

(湊太志、岩本修 [JAEA])

中性子誘起核分裂の核分裂収率は、工学的応用のみならず、RI製造という観点からも重要な情報である。しかし、ENDFやJENDLなど世界的に利用されている核分裂収率の核データの情報は、様々な問題点が指摘されながらも約25年間更新がされていない。新しい核分裂収率データを開発することは喫緊の課題となっており、本研究はこの課題を解決するため、初期核分裂収率と統計模型を用いた新たな数値計算コードの開発を行った。 ^{235}U の熱中性子誘起核分裂における核分裂収率に着目し、ガウス過程とベイズ最適化を利用した機械学習の手法を採用することで、統計模型に使われるパラメータを効率的に決定した。その結果、ガンマ線やベータ線の崩壊熱だけでなく、遅発中性子収率も再現することができる核分裂収率のデータを作成することができた。この成果は、論文にまとめPhysical Review Cに投稿をした。

ベータ崩壊に対する原子核相転移の影響

(吉田賢市 [大阪大]、Yifei Niu [蘭州大]、湊太志)

原子核は変形するユニークな量子多体系である。安定核近傍の原子核は実験が比較的容易であるため、その変形に対する理解は比較的進んでいるが、不安定な原子核の変形についてはいまだ未知の部分が多い。特に中性子過剰核側では、プロレート変形からオブレート変形へ突然変化する「相転移」が理論的に予測されている同位体がある。そのような相転移が実際に存在するか確認するために、様々な実験計画が世界中で進められている。しかし、原子核の変形度を実験で直接調べることは、寿命が短くなるほど難しいことから、間接的にその変形度を調べる手法を模索する必要がある。その方法の一つとして、RIビームを使った実験で比較的容易である原子核のベータ崩壊半減期測定があげられる。本研究では、相転移を起こす候補であるZr同位体の変形度とベータ崩壊半減期の関係性について、平均場理論と乱雑位相近似法を用いて理論的に調べた。この研究の特徴点は、原子核の表面振動による高次効果を媒介にした変形効

果の検証である。我々の解析の結果、プロレート変形とオブレート変形で半減期には大きな違いがあり、ベータ崩壊半減期の測定を通して相転移を確認できる可能性があることを指摘した。本研究の成果は論文として Physical Review C に投稿し、公開されている。

ベータ崩壊に対する原子核相転移の影響

(田中翔也 [RIKEN]、西村信哉 [RIKEN]、湊太志、有友嘉浩 [近畿大])

r-process 元素合成過程では、星の中で中性子過剰な重い原子核が作られていることが予測されている。特に、ウランのような重い原子核が作られると、核分裂現象が r-process の元素分布に影響を及ぼすと考える。r-process 元素合成では、自然界には存在しない中性子過剰なウラン同位体などが合成されるため、それらの核分裂収率の情報が必要になる。しかし、実験的にそのような重い中性子過剰核を合成し、さらに核分裂させてその収率を測定するという事は非常に難しい。そのため、理論モデルを用いた予測が必須となる。本研究では Langevin モデルを用いて、初期核分裂収率分布と核分裂の全運動エネルギーを予測し、その結果を統計モデルのインプットデータとして最終的な核分裂収率を求める理論体系の構築を行った。この理論体系をベースにした数値計算コードにより、いくつかの中性子過剰なウラン同位体の核分裂収率の計算を行った。この研究で得られた特に興味深い成果は、核分裂片の全運動エネルギーと核分裂収率の関係性によって、中性子過剰になるほど即発中性子数が減るという非自明な現象が発現することである。本研究の成果は Physical Review C に投稿し、公開されている。

$t \cdot {}^3\text{He}$ 分解効果の系統的解析

(小川翔也、渡邊慎 [岐阜高専]、松本琢磨 [阪大 RCNP, 九州大学]、緒方一介)

近年、重陽子や t , ${}^3\text{He}$, α といった様々なクラスターが原子核の中に存在することが期待されている。原子核のクラスター構造は、そのクラスターを叩き出すノックアウト反応によって精力的に研究されており、理論的な分析の上でクラスターの脆さ(分解効果)は重要な情報である。 α の分解効果は非常に小さく、弱束縛系である重陽子の分解効果は強いことがよく知られている一方で、 t , ${}^3\text{He}$ の分解効果はこれまで不明瞭であった。そこで、本研究では $t \cdot {}^3\text{He}$ を入射核とする分解反応を通して、それらの分解効果を明らかにした。観測量である分解断面積の系統的な分析の結果、 $t \cdot {}^3\text{He}$ の断面積の絶対値は、分解効果が強い重陽子の断面積の 1/3 倍程であることがわかった。これは今後行われる $t \cdot {}^3\text{He}$ ノックアウト反応解析に向けた非常に重要な結果であり、その成果は論文としてまとめ、Physical Review C に掲載された。

サイズを付加したダイクォークのカイラル模型の研究

(金龍熙 (D3)、岡真 [JAEA, RIKEN]、鈴木溪 [JAEA])

ハドロン物理学において、バリオンは3つのクォークで構成される複合粒子である。3つのクォークのうち重いクォーク(チャーム・ボトム)を1つだけ含むシングルヘビーバリオンは、残り2つの軽いクォーク(アップ・ダウン・ストレンジ)を「ダイクォーク」という描像として顕著に持つと期待される。

従来は、ヘビーハドロンのエネルギースペクトルや崩壊反応についてダイクォークのカイラル有効模型を用いて研究してきたが、副構造であるダイクォークは点粒子として扱ってきた。本研究ではダイクォークのカイラル有効模型で扱われるダイクォークについて、ダイクォーク内部にあるクォーク2つの間にサイズ・密度分布を付加し、ダイクォークの質量変化について研究を進めた。

本研究で考察されたダイクォークについて、それらの質量とカイラル対称性の保存との関係には先行研究と大きな違いは見受けられなかった。しかし、負のパリティを持つ擬スカラーダイクォーク($J^P = 0^-$)とベクトルダイクォーク($J^P = 1^-$)の2つは、付加された2クォーク間のサイズが大きく影響し、点粒子として見た場合よりも軽い質量値が得られた。

$(p, p'x)$ 反応と $(d, d'x)$ 反応の表面性の差異

(中田響 (D3)、中山梓介 [JAEA]、吉田数貴 [JAEA]、渡辺幸信 [九大総理工]、緒方一介)

現象論的モデルによって、 $(p, p'x)$ 反応のエネルギースペクトルの実験データを包括的に再現するには、反応の表面性を有効的にとり入れる「表面効果」の導入が必要であることが知られている。一方、 $(d, d'x)$ 反応では、実験データが非常に少なく、表面効果に関する議論はほとんどされていない。そこで本研究では、微視的反応模型である半古典歪曲波模型を用いて $(p, p'x)$ 反応と $(d, d'x)$ 反応の表面性を調査した。その結果、 $(p, p'x)$ 反応よりも $(d, d'x)$ 反応の方が、原子核の表面付近で反応が起きやすいことが明らかになった。また、その結果に基づき、現象論的モデルにおける「表面効果」を強くすることによって、 $(d, d'x)$ 反応の実験データを概ね再現することができた。この研究成果は論文としてまとめられ、Physical Review C に掲載された。

核子ノックアウト反応における off-shell 性の研究

(松川怜史、小川翔也、緒方一介)

魔法数の破れのメカニズムを解明するためには、原子核における一粒子構造の性質を理解することが非常に重要となる。中でも核子ノックアウト反応は、一粒子構造を最もクリーンに決定する反応の1つとして注目されている。この反応において、原子核内での2核子散乱は反応前後でエネルギーが保存しない「off-shell」散乱であるが、

多くの場合、この off-shell 性を無視する近似である「on-shell 近似」によって反応の解析がなされている。

本研究では、off-shell 性を考慮することができる Melbourne の有効相互作用を導入することで、核子ノックアウト反応における on-shell 近似の正当性を調べた。解析の結果、入射エネルギーに対して核内核子の束縛エネルギーの大きさが大きい場合、on-shell 近似の結果は off-shell 計算の結果と乖離し、このような条件下では off-shell 性を考慮して反応の解析を行う必要がある可能性が示唆された。

反対称スピン軌道力の原子核構造に対する影響

(木田浩樹、福井徳郎 [九大基幹教育院]、湊太志)

原子核構造を理論的に理解するうえで重要な手法の一つに密度汎関数理論がある。原子核の密度汎関数理論では、核子間力として有効 2 体相互作用を使って一粒子の波動関数とエネルギー準位が求められる。実際には、2 体相互作用に加えて 3 体の密度依存型の有効相互作用も使われており、この 2 つの相互作用が原子核の構造を記述するうえで欠かすことができないインプットとなっている。近年、カイラル有効場理論の低エネルギー近似から求められる 3 体の反対称性スピン軌道力 (ASSOF) が原子核の微視的な性質を決定するうえで重要であることが指摘された。この ASSOF は従来の平均場理論には考慮されていない相互作用である。我々は、密度汎関数理論の中で ASSOF の効果を調べるために、ゼロレンジ近似のもとで有効 3 体相互作用の型に変換することを目指している。今年度は、研究の準備として Skyrme 相互作用を用いた平均場理論の数値計算コードの開発を実施した。計算コードの開発は既に完了し、今後は ASSOF が有効 3 体相互作用としてどのように記述されるのか調べていく予定である。

発表論文

《原著論文》

Effective polarization in proton-induced alpha knockout reactions:

T. Edagawa, K. Yoshida, Y. Chazono, and K. Ogata,

Phys. Rev. C **107** (2023), 054603.

Systematic analysis of t and ${}^3\text{He}$ breakup reactions:

S. Ogawa, S. Watanabe, T. Matsumoto, and K. Ogata,

Phys. Rev. C **108** (2023), 024604.

Level Structures of $^{56,58}\text{Ca}$ Cast Doubt on a doubly magic ^{60}Ca :

S. Chen *et al.*,

Phys. Lett. B **843** (2023), 138025.

Intruder configurations in ^{29}Ne at the transition into the island of inversion: Detailed structure study of ^{28}Ne :

H. Wang *et al.*,

Phys. Lett. B **843** (2023), 138038.

Systematic analysis of the nuclear absorption effect on the cross section of the knockout reaction:

S-I. Shim, K. Yoshida, and K. Ogata,

J. Phys. Soc. Japan **92** (2023), 094201.

Description of inclusive ($d, d'x$) reaction with the semiclassical distorted wave model:

H. Nakada, K. Yoshida, and K. Ogata,

Phys. Rev. C **108** (2023), 034623.

First observation of ^{28}O :

Y. Kondo *et al.*,

Nature **620** (2023), 965.

Validation of the ^{10}Be ground state molecular structure using $^{10}\text{Be}(p, p\alpha)^6\text{He}$ triple differential reaction cross-section measurements:

P. J. Li *et al.*, Phys. Rev. Lett. **131** (2023), 212501.

PIKOE: A computer program for distorted-wave impulse approximation calculation for proton induced nucleon knockout reactions:

K. Ogata, K. Yoshida, and Y. Chazono,

Comp. Phys. Comm. **297** (2024), 109058.

Onset of collectivity for argon isotopes close to $N = 32$:

B. D. Linh *et al.*,

Phys. Rev. C **109** (2024), 034312.

Nuclear many-body effects on particle emission following muon capture on ^{28}Si and ^{40}Ca :

F. Minato, T. Naito, and O. Iwamoto,
Phys. Rev. C **107** (2023), 054314.

β -decay half-lives as an indicator of shape-phase transition in neutron-rich Zr isotopes with particle-vibration coupling effects:

K. Yoshida, Yifei Niu, and F. Minato,
Physical Review C **108** (2023), 034305.

Postfission properties of uranium isotopes: A hybrid method with Langevin dynamics and the Hauser-Feshbach statistical model:

S. Tanaka, N. Nishimura, F. Minato, and Y. Aritomo,
Physical Review C **108** (2023), 054607.

Parity assignment for low-lying dipole states in ^{58}Ni :

T. Shizuma, M. Omer, T. Hayakawa, F. Minato, S. Matsuba, S. Miyamoto, N. Shimizu, and Y. Utsuno,
Physical Review C **109** (2024), 014302.

《その他の論文》

著書

講演

《海外での講演》

Effects of two particle two hole configurations on particle emissions following muon capture:

Futoshi Minato, Tomoya Naito, Osamu Iwamoto,

The 2023 Fall Meeting of the Division of Nuclear Physics of the APS and JPS, Nov. 26–Dec. 1, 2023, Hawaii.

Description of the dineutron knockout reaction:

S. Ogawa, Y. Chazono, K. Yoshida, K. Ogata,
5th International Workshop on Quasi-Free Scattering with Radioactive-Ion Beam
2023, Oct. 1–6, 2023, Lefkada, Greece. (Invited)

Description of inclusive ($d, d'x$) reaction with the semiclassical distorted wave model:
H. Nakada, K. Yoshida and K. Ogata,
16th International Conference on Nuclear Reaction Mechanisms, Jun. 12–16, 2023,
Varenna, Italy.

《国内での講演》

原子核ダブルフォノン励起の集団運動:

湊太志

中性子星を中心とした宇宙核物理研究のこれまでとこれから
2024年3月9–10日, 九州大学 (招待講演)

ミューオン捕獲反応の理論計算から見えた核データの新たな可能性:

湊太志

日本原子力学会春の大会 2024, 2024年3月26–28日, 近畿大学

Nuclear structures observed from global beta-decay predictions and measurements:

Futoshi Minato

Advancing physics at next RIBF (ADRIB24), 2024年1月23–24日, RIKEN (invited)

核分裂片のエネルギー放出と中性子放出量:

湊太志

第3回 研究用原子炉を用いた原子核素粒子物理学 (FPUR-III), 2024年1月18–19日,
福井大学 (招待講演)

統計崩壊コード CCONE を用いた核分裂収率計算の実装と遅発中性子割合の予測:

湊太志

原子力学会シグマ調査特別委員会「核分裂核データ評価手法の高度化」, 2023年12月
(招待講演)

ミューオン捕獲反応後の放出粒子エネルギーの分布と反跳エネルギー:

湊太志

原子力学会シグマ調査特別委員会「ミューオン核データ研究会」, 2023年12月 (招待講演)

Calculation of Fission Fragment Yields for Thermal Neutron Reaction on ^{239}Pu :

Futoshi Minato

2023年度核データ研究会, 2023年11月15-17日, 茨城県 東海村

運動量空間で連続状態を正確に取り入れた際の乱雑位相近似~Berggren basis + RPA
~:

湊太志

九州大学理論核物理研究会「現代核物理の拡がりと展望」, 2023年7月19-21日, 九州大学

理論から見た RIBF 取得すべきデータ 2:

湊太志

TRIP-RIBF 実験キックオフミーティング, 2023年4月21日, 理化学研究所 和光市キャンパス (招待講演)

3体核構造と核反応理論の融合:

小川翔也

九州大学理論核物理研究会「現代核物理の拡がりと展望」, 2023年7月19-21日, 九州大学

Theoretical description of the dineutron knockout reaction:

小川翔也, 茶園亮樹, 吉田数貴, 緒方一介,

Microscopic approach from pair correlation to pair condensation, 2023年9月4-6日, 大阪大学核物理研究センター (招待講演)

Theoretical study on the dineutron knockout reaction:

S. Ogawa, Y. Chazono, K. Yoshida, K. Ogata,

Reimei Workshop “Intersection of Nuclear Structure and Direct Reaction, Feb. 28 - Mar. 1, 2024, Tokai, Ibaraki. (Invited)

ダイニュートロンノックアウト反応の理論的研究:

小川翔也, 茶園亮樹, 吉田数貴, 緒方一介, 日本物理学会 2023年春季大会, 2024年3

月 22–25 日, オンライン

ダイクォークのカイラル有効模型から見るバリオン:

金龍熙,

九州大学理論核物理研究会「現代核物理の拡がり」と展望, 2023 年 7 月 19–21 日, 九州大学

重陽子入射による包括的反応の記述:

中田響, 吉田数貴, 緒方一介,

九州大学理論核物理研究会「現代核物理の広がり」と展望, 2023 年 7 月 19–21 日, 九州大学

$(p, p'x)$ 反応と $(d, d'x)$ 反応の表面効果の差異:

中田響, 中山梓介, 吉田数貴, 渡辺幸信, 緒方一介,

物理学会 2024 年春季大会, 2024 年 3 月 18–21 日, オンライン

$(p, p'x)$ 反応と $(d, d'x)$ 反応の表面効果の差異:

中田響, 中山梓介, 吉田数貴, 渡辺幸信, 緒方一介,

原子力学会 2024 年春の年会, 2024 年 3 月 26–28 日, 近畿大学東大阪キャンパス

複雑ネットワークを用いた感染症予測の数理モデル:

松川怜史

九州大学理論核物理研究会「現代核物理の拡がり」と展望, 2023 年 7 月 19–21 日, 九州大学

外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》

科学研究費補助金, 特別推進研究 (2021 年度–2025 年度)

核物質内クラスター生成機構の総合的解明

研究代表者: 上坂友洋 [理研仁科センター]

研究分担者: 緒方一介

科学研究費補助金, 基盤研究 (A) (2021 年度–2025 年度)

不安定核反応でさぐる高運動量の近接核子対の研究

研究代表者：中村隆司 [東工大]

研究分担者：緒方一介

科学研究費補助金, 基盤研究 (C) (2020 年度-2023 年度)

環境を包有する量子反応理論に基づく宇宙元素合成反応の描述

研究代表者：緒方一介

科学研究費補助金、基盤 B(一般) (2021 年度-2023 年度)

核分裂事象の物理解明による高度原子力利用のためのデータ基盤開発

研究代表者：石塚知香子

研究分担者：湊太志

科学研究費補助金、基盤 B(一般) (2021 年度-2023 年度)

重力波・キロノヴァ観測から迫る r プロセス元素合成メカニズムの統一的理解

研究代表者：西村信哉

研究分担者：湊太志

科学研究費補助金、基盤 C(一般) (2023 年度-2025 年度)

ミュオン起因の半導体ソフトエラー評価に向けたミュオン捕獲放出粒子の理論予測

研究代表者：湊太志

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

JST, ERATO 関口三体核力プロジェクト (2023 年度-2029 年度)

量子多体系精密計算の確立：高精度原子核反応 計算の開発

研究代表者：関口仁子 [東京工業大学]

サブグループリーダー：緒方一介

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

金 龍熙 (D3): 日本学術振興会特別研究員 DC1 (2021 年 4 月-2024 年 3 月)

他大学での研究と教育

湊太志：セミナー「Particle yields following muon capture reactions considering 2p-2h excitations」、2023 年 4 月、理化学研究所

湊太志：セミナー「Particle yields following muon capture reactions considering 2p-2h excitations」と原子核構造に関する共同研究、2023年6月、蘭州大学

湊太志：セミナー「機械学習を取り入れた核分裂収率評価」、2023年9月、近畿大学

湊太志：セミナー「Nuclear Structure and Variety of Nuclear Resonances」と原子核構造に関する共同研究、2024年3月、復旦大学

緒方一介：大阪大学核物理研究センター特任教授(クロスアポイントメント)として、当該研究所における研究と教育を担当した。

学部4年生卒業研究

宇山純一(指導教員 湊太志):

変形ハロー核における共鳴の役割

宇都宮颯斗(指導教員 湊太志):

Skyrme Hartree Fockによるカルシウム40の電子捕獲

武智雄大(指導教員 湊太志):

2次元波束の時間発展を数値計算する方法

伊達創希(指導教員 緒方一介):

中性子の海の中での陽子捕獲反応

田中峻(指導教員 緒方一介):

陽子捕獲反応に対する漸近規格化係数法によるアプローチ

修士論文

松川怜史(指導教員 緒方一介):

核子ノックアウト反応における off-shell 性の研究

博士論文

金 龍熙(指導教員 緒方一介):

Properties of heavy hadrons studied with a chiral effective model of diquarks
(ダイクォークのカイラル有効模型を用いたヘビーハドロンの特質の研究)

外国人留学生の受け入れ

学外での学会活動

湊太志: RIBF 理論推進会議、委員

湊太志: JENDL 委員炉定数専門委員会、核種生成量崩壊熱 WG、議長

湊太志: RIBF-UEC、委員

受託研究・民間との共同研究

湊太志: アウトリーチ、夢ナビライブ

その他の活動と成果

九州大学理論核物理研究会「現代核物理の拡がりと展望」(2023年7月19-21日)を九州大学にて主催(参加人数およそ40人)

中田響: 日本原子力研究開発機構にて学生実習生として研究活動に従事,
研究課題 $(p, p'x)$ 反応と $(d, d'x)$ 反応における表面効果の解析,
2023年11月1-30日

九大原子核セミナー(5つ)

第979回 2023年4月25日

講師: 大田晋輔(大阪大学 RCNP)

演題: 核子物質における新奇超流動探索

第980回 2023年6月22日

講師: Alberto Mengoni (CERN)

演題: The neutron time-of-flight facility n_{TOF} at CERN

第981回 2023年8月23日

講師: 宮城宇志(Darmstadt 工科大学)

演題 : Neutron skin of ^{208}Pb from ab initio calculations

第 982 回 2023 年 11 月 10 日

講師 : Thomas Rauscher (Basel 大学)

演題 : The Molybdenum Puzzle

第 983 回 2023 年 12 月 19 日

講師 : 鶴沢浩太郎 (京都大学)

演題 : 陽子中性子対相関を取り入れた生成座標法による $N = Z$ 奇々核の M1 遷移の解析

量子宇宙物理理論

研究室構成員

山本一博 教授

菅野優美 准教授 南部保貞 (特プロ) 准教授

松村央 (特プロ) 助教 倉持結 (特プロ) 助教 ギャロック芳村健佑 (特プロ)

助教

《 大学院 博士課程 》

杉山祐紀 三木大輔

《 大学院 修士課程 》

西田到生 銚之原恒平 西村郁哉 谷将樹

柏木海翔 山崎優樹 谷口彰

《 学部 卒業研究生 》

廣谷知也 福澄諒太郎 山崎真尋 畠山広聖

《 訪問研究者 》

Ar Rohim Shi-Yuin LIn Bei-Lok Hu

担当授業

一般相対性理論 (山本一博), 量子力学II(山本一博), 量子力学I・同演習 (山本一博), 九州大学で学ぶ宇宙科学と技術 A(山本一博)(1コマ), 現代物理学基礎 (菅野優美), 物理学基礎演習 (菅野優美), 宇宙物理学 (菅野優美), 物理学ゼミナール (松村央), 物理学特別研究I (山本一博, 菅野優美, 松村央), 物理学特別研究II(山本一博, 菅野優美, 松村央), 量子力学I・同演習 (松村央), 物理学特別講義7(松村央)

研究・教育目標と成果

重力の量子性に関する研究 (山本一博)

重力は量子力学に従うのかという重力の量子性の問題は、重力の量子論の出発点となる基本的問題であるが、これまであまり研究の進んでいない問題として、注力してきた研究テーマである。近年量子情報理論や量子科学技術の進展によって、この基本的問題に関する研究が注目されている。特に重力が量子もつれを作れるかどうか、重力が非局所的な量子相互作用かどうかの検証となることが指摘され、重力が作る量子も

つれに着目した研究を推進している。これまで松村氏、杉山君、三木氏らとこの問題に関する研究を進めてきた。令和5年度は、これらに関する研究として、光学機械振動子（オプトメカ）を用いて重力量子もつれを生成する条件を明らかにする研究を推進している。このための重力場の量子論と重力が作る量子もつれとの関係など多面的に研究も推進した。関連して、光格子時計の有限サイズにともなう重力によるディフエイズ効果や、量子状態にある調和振動子や量子場の量子力学的性質（非実在性）を検証するレゲットガウズ不等式の破れに関する研究を学生との共同研究として進めた。重力の量子性の研究は、量子重力に関わる基礎物理と量子技術の融合研究という側面を持ち、また将来の検証実験では宇宙空間での検証実験が理想的である。そのため、重力の量子性を柱として、基礎科学、量子技術、宇宙利用が融合する学際研究領域の開拓を目指す将来研究構想を未来の学術振興構想として行なった日本学術会議への提案が採択された。また、関連するテーマのワークショップ「Gravity and Quantum Workshop Kyushu University」を開催した。

チャーレン・サイモン重力におけるアクシオンドメインウォール起源の重力波の円偏光 (菅野優美、谷口彰)

宇宙の構造形成を引き起こす重力源は、暗黒物質だと分かっているものの、未だに直接検出されていない。最近、アクシオンが暗黒物質であるという説が有力になっている。そこで、重力波がこのアクシオンドメインウォールを通過することにより、円偏光が生成されることを示した。この円偏光が検出されれば、アクシオンドメインウォールの存在を示唆することになり、暗黒物質に寄与していることが判明する。

リュードベリ原子を用いた高周波重力波の検出 (菅野優美、谷口彰)

原始ブラックホールが銀河系内にある場合には、高周波の重力波が生成される可能性がある。私たちはリュードベリ原子を用いた量子センシングを利用して、高周波重力波を検出する方法を考えた。リュードベリ原子は、大きな電気双極子モーメントを持つため、微弱な電場に対して非常に感度が良い。重力波は磁場と相互作用すると、電場が生成されることに着目して、実験室で磁場を用意し、重力波が来たときに、磁場との相互作用で生成される電場を、リュードベリ原子で測定することで、間接的に重力波を捉えることを考案した。その結果、26.4ギガヘルツの高周波重力波に対して、リュードベリ原子を用いた検出器では、 10^{-20} の感度が出ることがわかった。

重力場の量子不確定性と粒子間の量子もつれ (杉山祐紀, 松村央, 山本一博) 量子と重力の融合理論の解明に向けて、重力場の量子現象を理論的に理解する必要がある。我々の先行研究では、重力場の量子化が量子重ね合わせにある粒子間の重力相互作用が因

因果律と相補性と整合的になることを保証していることがわかった。その続きとして粒子間の量子もつれ現象との関係を探った。その結果、因果律が成立しているもとの、粒子間に量子もつれが生成しないことが重力場の量子化により保証されているとわかった。さらに量子もつれの非生成が相補性を導くこともわかった。これは因果律と相補性が矛盾なく成立する本質は量子もつれ生成しないことであるということが明らかになった。

ポアンカレ対称性をもつ量子マルコフマスター方程式（柏木海翔、松村央）本研究では相対論的に振る舞う開放量子系の有効理論構築に向けて、特殊相対論的な対称性であるポアンカレ対称性をもつ量子マルコフマスター方程式について考えた。特に方程式の系統的な構築方法を提案し、最もシンプルな崩壊するスカラー粒子のマスター方程式を書き下した。今後は具体的なモデルからどのようにこのマスター方程式が得られるかを議論することで、本研究のアプローチの適用範囲について理解していく。

巨視的量子系を用いた重力の量子性の検証（三木大輔、松村央、山本一博）今年度は、重力の量子性の検証を目指して、2つの巨視的な鏡間に重力により生じる量子もつれの評価を行った。重力を量子化した量子重力理論はこれまで盛んに研究されてきたが、重力の量子現象はこれまで全く検証されていない。そこで、量子力学の重ね合わせの原理に基づく重力による量子もつれ生成が議論されている。量子もつれは古典相互作用では生成できない量子相関であり、重力による量子もつれ生成は重力相互作用が量子的な演算子として振る舞うことの証拠となる。しかし、重力相互作用は非常に小さいため、重力の量子効果の検証には重力効果が顕著な巨視的物体の量子状態が必要である。そこで、巨視的な鏡と光が相互作用する光学機械振動子系に着目した。巨視的な鏡は環境からの熱雑音により量子性を喪失するが、出力光の測定結果に基づき鏡を量子制御することで熱雑音の影響を抑える。将来的には、mgスケールの鏡の量子状態を実験的に実現することが期待されている。私達はフーリエ空間において解析を行い、量子制御下にある2つの鏡間に量子もつれが生じる条件を導出した。その結果として、重力相互作用が熱ノイズと測定強度より大きい場合に量子もつれが生成可能であることを示した。また、次年度にかけて時間領域における量子もつれの評価を行い、光との結合を通じた量子制御を行うことにより、量子もつれの生成時間が短縮されることを示した。さらに、信号が雑音より大きくなるために必要な総時間を評価し、パラメータの最適化を行った。しかし、量子もつれの検出には熱ノイズを非常に小さく抑える必要がある。来年度は、熱ノイズより重力の影響が大きくなるようなセットアップを模索したい。また、量子もつれを用いない重力の量子性の検証手法にも取り組みたい。

非摂動的計算を用いた相対論的量子オートー熱機関 (ギャロック芳村建佑) 本研究では任意の曲がった時空上で量子場と相互作用する量子ビットを考え、量子場から熱力学的仕事を抽出する相対論的量子オートー熱機関について考えた。特に非摂動的に計算できる状況を考え、抽象代数を用いて量子ビットが取り出す仕事量を導出し、1度目の相互作用が2度目の相互作用に影響を与えるときのみ仕事を取り出せることを示した。

量子揺らぎによる位置の重ね合わせ状態のデコヒーレンス (ギャロック芳村建佑、杉山祐紀、松村央、山本一博) 重力の量子性の実証実験では、粒子の位置を重ね合わせた状態を用いる。その際には粒子内のスピン自由度の重ね合わせ状態を利用することになるが、これが真空揺らぎや熱的揺らぎによってデコヒーレンスを起こしてしまう可能性がある。本研究ではこのデコヒーレンスを場の量子論の観点から議論し、その度合いを計算した。特に熱的揺らぎによるデコヒーレンスは温度とともに度合いが大きくなることが示された。

発表論文

《 原著論文 》

K. Hatakeyama, D. Miki, M. Tani, Y. Yamasaki, S. Iso, A.S. Adam, Ar Rohim, and K. Yamamoto,

Violation of the two-time Leggett-Garg inequalities for a harmonic oscillator
Physical Review A, 110(1), 012223 (2024)

F. Nishimura, Y. Kuramochi, K. Yamamoto,

Classical gravitational effect on the standard quantum limit of finite-size optical lattice clocks in estimating gravitational potential,
Physical Review A, 108(6), 063112 (2023)

D. Miki, A. Matsumura, K. Yamamoto,

Negativity volume of the generalized Wigner function in gravitating hybrid system,
arXiv:2311.10980

M. Tani, K. Hatakeyama, D. Miki, Y. Yamasaki, K. Yamamoto,

Violation of the two-time Leggett-Garg inequalities for a coarse-grained quantum field,
Phys. Rev. A 109, 032213 (2024)

D. Miki, A. Matsumura, K. Yamamoto,
Quantum signature of gravity in optomechanical systems with continuous measurement,
Phys. Rev. D 109, 064090 (2024)

Y. Sugiyama, A. Matsumura, K. Yamamoto,
Quantum uncertainty of gravitational field and entanglement in superposed massive particles
Physical Review D 108 (10), 105019(2023)

S. Kanno, J. Soda, A. Taniguchi,
Circularly polarized gravitational waves in Chern-Simons gravity originated from an axion domain wall
Phys. Rev. D 108 (8), 083525 (2023)

S. Kanno, J. Soda, A. Taniguchi,
Search for high-frequency gravitational waves with Rydberg atoms
arXiv:2311.03890 [gr-qc]
K. Kashiwagi, A. Matsumura,
Markovian quantum master equation with Poincare symmetry
Physical Review A 109 (5), 052214 (2024)

Y. Kaku, T. Fujita, A. Matsumura
Enhancement of quantum gravity signal in an optomechanical experiment
Physical Review D 108 (10), 106014 (2024)

S. Yamano, T. Matsuura, Y. Kuramochi, T. Sasaki, M. Koashi
General treatment of Gaussian trusted noise in continuous-variable quantum key distribution
arXiv:2305.17684
T. Matsuura, S. Yamano, Y. Kuramochi, T. Sasaki, M. Koashi
Refined finite-size analysis of binary-modulation continuous-variable quantum key distribution
Quantum 7, 1095 (2023)

Y. Kuramochi, H. Tajima

Wigner-Araki-Yanase Theorem for Continuous and Unbounded Conserved Observables
Phys. Rev.Lett. 131 (2023) 21, 210201

K. Gallock-Yoshimura,

Relativistic quantum Otto engine: instant work extraction from a quantum field,
JHEP 01, 198 (2024)

《その他の論文》

著書

講演

《海外での講演》

Feasibility of generating quantum states in optomechanics two-mode theory of suspended mirror coupled to cavity light: Wiener filter analysis

Kazuhiro Yamamoto,

July 17-21 2023, 13th annual Conference on relativistic quantum information (North),
Technical University of Crete, Chania, GREECE

Toward testing quantum nature of gravity

Kazuhiro Yamamoto

July 3-7 2023, Laser Physics Workshop, LPHYS23(招待講演) (オンライン)

Towards the detection of nonclassical primordial gravitational waves

Sugumi Kanno, (招待講演)

July 3-7 2023, VX International Conference on Gravitation, Astrophysics and Cosmology, Kolon Hotel, Gyeongju, KOREA

Circularly polarized gravitational waves in Chern-Simons gravity originated from an axion domain wall

Sugumi Kanno, (招待講演)

12月4-7日 2023, Large-scale Parity Violation Workshop, ASIAA, Taipei, Taiwan

Indirect detection of gravitons through quantum entanglement

Sugumi Kanno,

Sep 10-15, 2023, Quantum 2023, University of Torino, Torino, ITALY

Reduced dynamics with Poincare symmetry in an open quantum system

Akira Matsumura

July 17-21, 13th annual conference on relativistic quantum information (North), Technical University of Crete, Chania, GREECE

《国内での講演》

重力・宇宙と量子情報科学

松村 央

3月28日、第27回体験物理学 物理の世界を体験しよう、九州大学

リュードベリ原子を用いた高周波重力波の探索

谷口 彰

3月18-21日、物理学会2024年春季大会、オンライン

調和振動子における二時刻 Leggett Garg 不等式の破れ

畠山 広聖

3月18-21日、物理学会2024年春季大会、オンライン

量子制御されたオプトメカ系における重力の量子性の検証

三木 大輔

3月18-21日、物理学会2024年春季大会、オンライン

非有界かつ連続な保存量に対する Wigner-Araki-Yanase 定理の証明

倉持 結

3月18-21日、物理学会2024年春季大会、オンライン

ポアンカレ対称性を持つ量子マスター方程式の理論

柏木 海翔

3月18-21日、物理学会2024年春季大会、オンライン

Circular polarization of gravitational waves passing through an axion domain wall

Akira Taniguchi

2月19-23日、Gravitational wave astronomy / cosmology、YITP, Kyoto University

Search for high-frequency gravitational waves with Rydberg atoms

Akira Taniguchi

3月6-8日、Joint workshop on General Relativity and Cosmology Sunshine Shirako, Chiba

Search for high-frequency gravitational waves with Rydberg atoms

Sugumi Kanno (招待講演)

2月7-9日、Third mini-workshop on the early universe、Nobuyoshi Ohama Memorial Hall, Ishigaki island, Okinawa

Circular polarization of gravitational waves passing through an axion domain wall

Akira Taniguchi

2月7-9日、Third mini-workshop on the early universe、Nobuyoshi Ohama Memorial Hall, Ishigaki island, Okinawa

ダイナミカルな重力場に起因する量子もつれとデコヒーレンス

杉山 祐紀

1月16日、九州大学量子ネイティブ育成研究シンポジウム (ポスター)、九州大学

リュードベリ原子を用いた高周波重力波の探索 (ポスター発表)

谷口 彰

12月25-27日、第36回理論懇シンポジウム、弘前大学

光格子時計を用いた重力ポテンシャル推定の原理的境界 - 古典重力によるデフェイジ
ングが標準量子限界に与える影響

西村 郁哉

12月17-19日、第49回量子情報技術研究会 (QIT49) OIST

Quantum heat engine driven by quantum fields

Kensuke Gallock-Yoshimura

12月8日、RQI Circuit、オンライン

二時刻レゲットゲージ不等式の破れ 2 場の理論への応用

谷 将樹

12月2日、第129回日本物理学会九州支部例会、長崎大学

二時刻レゲットゲージ不等式の破れ 1 調和振動子への応用

畠山 広聖

12月2日、第129回日本物理学会九州支部例会、長崎大学

ポアンカレ対称性を持つ量子マスター方程式の理論

柏木 海翔

12月2日、第129回日本物理学会九州支部例会、長崎大学

重力波の円偏光とアクシオンドメインウォール

谷口 彰

12月2日、第129回日本物理学会九州支部例会、長崎大学

Generating quantum entanglement between macroscopic objects in optomechanical systems with feedback control

Daisuke Miki

11月27日-12月1日、Feedback in Quantum Machines 2023 (Poster)、OIST

Investigation of axion by the circular polarization of gravitational waves passing through a domain wall

Akira Taniguchi

11月27日-12月1日、The 32nd Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan、Nagoya University

Recent progress on Analysis of Quantum Field Theory

杉山 祐紀

10月13日、研究室ミーティング、東京大学物性研究所 岡研究室

世界を巡って考えた宇宙

菅野 優美

9月29-30日、Cosmology and Gravity at Kobe 2023、神戸大学統合研究拠点コンベンションホール (ポートアイランド)

Search for axion with circular polarization of gravitational waves

谷口 彰

9月29-30日、Cosmology and Gravity at Kobe 2023、神戸大学統合研究拠点コンベンションホール (ポートアイランド)

モノガミーによる重力場の量子性

杉山 祐紀

9月29日、The 1st QJM workshop、広島大学

Indirect detection of gravitons through quantum entanglement

Sugumi Kanno

9月10-15日、Quantum 2023、University of Torino, Torino, ITALY

アクシオンドメインウォールを通過する重力波に生じる円偏光

谷口 彰

9月16-19日、日本物理学会第78回年次大会(2023年)、東北大学

光と結合した懸架鏡の有効的な記述：回転自由度のQ値への影響

杉山 祐紀

9月16-19日、日本物理学会第78回年次大会(2023年)、東北大学

オプトメカの量子制御を通じた重力による量子もつれ生成

三木 大輔

9月16-19日、日本物理学会第78回年次大会(2023年)、東北大学

量子重力解明に向けたポアンカレ不変な量子マスター方程式の理論

松村 央

9月16-19日、日本物理学会第78回年次大会(2023年)、東北大学

On the quantum nature of gravity and optomechanical tests

Kazuhiro Yamamoto 招待講演

9月12-16日、ExU-YITP Workshop on Holography, Gravity and Quantum Information、YITP Kyoto University

量子重力と非ユニタリー有効理論

松村 央

8月20-22日、重力と量子で紡ぐ宇宙、公共の宿しぶき温泉湯楽里、福井

原子重力波が干渉計に与えるノイズとその検出可能性の推定

山崎 優樹

8月1-4日、2023年度第53回天文・天体物理若手夏の学校、東京大学

アクシオンドメインウォールを通過する重力波の円偏光

谷口 彰

8月1-4日、2023年度第53回天文・天体物理若手夏の学校、東京大学

連続変数に対する擬確率関数の定式化と応用

谷 将樹

8月1-4日、2023年度第53回天文・天体物理若手夏の学校、東京大学

ポアンカレ対称性を持つ有質量場の量子マスター方程式

柏木 海翔

8月1-4日、2023年度第53回天文・天体物理若手夏の学校、東京大学

場の量子論に基づいた2粒子間の量子もつれ生成と場の不確定性関係に関する研究

杉山 祐紀

6月2日、横浜国立大学素粒子論研究室セミナー、横浜国立大学

Circularly polarized gravitational waves in Chern-Simons gravity originated from an axion domain wall

Akira Taniguchi

5月8-9日、Gravity and Quantum Workshop、九州大学

Indirect detection of gravitons through quantum entanglement

Sugumi Kanno

5月8-9日、Gravity and Quantum Workshop、九州大学

Leggett-Garg inequalities for testing quantumness of gravity and macroscopic system

Kazuhiro Yamamoto

5月8-9日、Gravity and Quantum Workshop、九州大学

Generating quantum entanglement between macroscopic objects

Daisuke Miki

5月8-9日、Gravity and Quantum Workshop、九州大学

Theory of dynamical map for describing Gravity of Quantum matter

Akira Matsumura

5月8-9日、Gravity and Quantum Workshop、九州大学

Quantum uncertainty of gravitational field in superposed massive particles

Yuuki Sugiyama

5月8-9日、Gravity and Quantum Workshop、九州大学

外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》

科学研究費補助金、基盤 B(一般),

時間的相関と量子もつれから解明する重力の量子性の理論的研究

研究代表者：山本一博、研究分担者：南部保貞、松村央

科学研究費補助金、学術変革 A（公募研究）,

重力の量子性の検証に向けた懸架型光学機械振動子の精密理論模型の構築

研究代表者：山本一博

科学研究費補助金、基盤 C(一般),

アキシオンの量子性で迫る宇宙の起源と暗黒物質の正体

研究代表者：菅野優美

科学研究費補助金、基盤 B(一般),

高周波重力波物理学の開拓

研究代表者：早田 次郎、研究分担者：菅野 優美

科学研究費補助金, 若手研究,
重力による量子もつれで迫る重力の量子論
研究代表者：松村 央

科学研究費補助金, 若手研究,
混合または結合で閉じた量子測定および量子操作の数学的構造に関する研究
研究代表者：倉持結

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

日本学術振興会特別研究員 DC1 (三木大輔)

他大学での研究と教育

菅野 優美: 第5回名古屋大学素粒子宇宙コロキウムにおいて、講演を行なった。タイトルは、「私たちの宇宙は量子揺らぎから始まったのか？」

会場：名古屋大学、日時：3月31日(2023)

学部4年生卒業研究

畠山 広聖：(指導教員、山本一博)：
二時刻レゲットガーグ不等式の破れ 調和振動子への応用

福澄 諒太郎：(指導教員、山本一博)：
原始重力波のパラメータに対する観測的制限

廣谷 知也：(指導教員、山本一博)：
Leggett-Gerg inequalities with coherent-state projectors for a harmonic oscillator and chiral scalar field

山崎眞尋：(指導教員、菅野優美)：

Paleodetector によるニュートリノ測定と flux の修正

修士論文

西村郁哉：(指導教員、山本一博)：

光格子時計を用いた重力ポテンシャル推定の原理的限界 - 古典重力によるデフェイジ
ングが標準量子限界に与える影響-

西田 到生：(指導教員、菅野優美)：

インフレーションシナリオにおける曲率結合スカラー場の重力的粒子生成

銖之原 恒平：(指導教員、菅野優美)：

ラックホール超放射に対する解析的近似法

博士論文

杉山祐紀：(指導教員、山本一博)：

Theoretical Study on Quantum Mechanical Aspects of Gravity based on Quantum
Field Theory

外国人留学生の受け入れ

游雅翔（2年生後期）

学外での学会活動

外部機関研究滞在：ローレンスバークレー国立研究所とカリフォルニア工科大学に滞
在し研究活動をした。（松村央）

外部機関研究滞在：東京大学物性研究所 岡研究室（2023/10/10-20）（杉山祐紀）

外部機関研究滞在：カリフォルニア工科大学に滞在し研究活動をした。（三木大輔）

受託研究・民間との共同研究

その他の活動と成果

Workshop 「Gravity and Quantum workshop 2023 Kyushu University」開催（世話人：山本一博、日時：2023年5月8-9日、場所：九州大学、参加人数：20人）

2023年11月22日プレスリリース 保存則のもとでの量子操作の原理的制約に対する未解決問題を解決 倉持結助教（九州大学）、田島裕康助教（電気通信大学）

研究会「原子干渉計と重力波観測」開催（世話人：菅野 優美、日時：2024年1月22-23日、場所：九州大学、参加人数：27人）

（その他執筆）

（受賞）

粒子系理論物理学

研究室構成員

原田恒司 (基幹教育院) 教授 大河内豊 (基幹教育院) 教授
小島健太郎 (基幹教育院) 准教授 中里健一郎 (基幹教育院) 准教授
田尾周一郎 (基幹教育院, ~2023年9月) 助教

《 大学院 博士課程 》

大久保勇利 Carolina Sayuri Takeda 尹強 塚原壮平

《 大学院 修士課程 》

佐藤亮太 杉山龍汰 山本侑生

《 訪問研究者 》

福井徳朗 (基幹教育院)

担当授業

力学概論 (大河内豊), 電磁気学概論 (小島健太郎), 熱力学概論 (小島健太郎), 身の回りの物理学 A (原田恒司, 小島健太郎), 地球と宇宙の科学 (中里健一郎), 課題協学科目 (小島健太郎, 中里健一郎), 基幹教育セミナー (大河内豊, 小島健太郎, 中里健一郎), 数理という道具を手に入れよう (原田恒司), 「わかる」と「わかりやすい」 – オリジナル教材を作って考える – (中里健一郎), はじめての研究 (中里健一郎), 共創の数学 (大河内豊), 自然科学の基礎 (大河内豊)

研究・教育目標と成果

1 次相転移における有限温度効果 (原田恒司, 田尾周一郎, 尹強)

1 次相転移においては、「偽真空」から「真の真空」への量子論的トンネル効果によって相転移が進むことが知られているが、その温度効果について、鞍点近似を用いた計算を行った。これらについては既に Affleck, Linde らの先行研究があるが、彼らの結果は零温度での Callan & Coleman の結果を「自然に」拡張しただけで、その成立についてはあまり明確ではない。我々は有限のユークリッド時間間隔 (温度の逆数) での古典解の性質を調べ、それに基づく鞍点近似を量子力学系に行うことにより、有限温度での「偽真空」の崩壊確率を考えた。それとともに、先行研究の不満足な点を指

摘した。

カルツァ・クラインバブルによる弦理論の真空崩壊の解析 (大河内豊, 塚原壮平, 佐藤亮太)

弦理論は高次元理論であるために特有の真空崩壊が起こりうる。そのひとつに、5次元方向の時空が消滅してしまうような特異な崩壊が起こりうるということがウィッテンによって示されている。この真空崩壊では、バウンズ解が具体的に求められているので、より詳細な計算が可能となっている。こうした中、近年特異性をもつバウンズ解による真空の崩壊が注目を浴びているが、その考えを弦理論特有の崩壊に応用し解析を行なった。研究内容は佐藤氏の修士論文としてまとめられ、その後、論文としてまとめ arXiv に投稿した。

フラックス背景場中の高次元ゲージ理論のスペクトルおよび真空構造とその現象論 (小島健太郎, 大久保勇利, Carolina Sayuri Takeda)

余剰次元として T^2 を持つ6次元ゲージ理論では、余剰次元方向のゲージ場の背景場を通じて非自明なフラックスの存在を仮定することができる。フラックス背景場の下で得られる低エネルギー4次元有効理論は、カイラルなフェルミオンや軽いスカラーを有することから、素粒子の標準理論を超える理論の候補として注目されている。我々は、非可換ゲージ理論に基づく模型に注目し、6次元時空において一般性のあるフラックスおよびウィルソンライン位相の背景場のもとで、4次元有効理論に生じる質量スペクトルを議論した。さらに、その議論を拡張し、8次元時空上の模型で、フラックスおよびウィルソンラインの背景場を考慮し、ウィルソンライン位相に対する1ループ有効ポテンシャルを導出し、真空構造の解析を進めた。

T^2/Z_N オービフォールド余剰次元模型における不連続な境界条件を持つ電弱模型の構築 (小島健太郎)

コンパクトな余剰次元として T^2/Z_N ($N = 2, 3, 4, 6$) オービフォールドを仮定した高次元ゲージ理論に課される場の境界条件では、ゲージ変換の自由度に起因して、物理的に等価な同値類が定義される。我々は、以前の研究で、 T^2/Z_2 および T^2/Z_3 では、同値類の中に必ず対角型な行列で表される境界条件が存在することを示した。さらに、 T^2/Z_4 および T^2/Z_6 では、一般に同値類を考えても対角化できない境界条件が存在することを示した。このような対角化不可能な境界条件は、これまで現象論的に注目されていなかった。我々は、これまでに議論されていない、対角化不可能な境界条件を持つ高次元模型が電弱対称性の破れを記述する可能性について吟味した。本研究は、川村氏 (信州大学)、小平氏 (信州大学) および山下氏 (愛知医科大学) と共同で進めている。

重力との非最小結合を持つヒッグス場に基づくインフレーション模型象論 (小島健太郎, 山本侑生)

ヒッグス場は標準模型における唯一のスカラー場であり、ヒッグス場が重力と非最小な結合を持つ場合には、インフレーションを引き起こすインフラトンの役割を持ちうるということが知られている。このシナリオはヒッグスインフレーションと呼ばれ、多角的に研究されてきた。我々は、ヒッグスインフレーションのシナリオにおいて、特に重力理論の定式化が非自明な場合、すなわち Palatini 重力形式や Einstein-Cartan 重力形式、および修正重力理論に着目し、この場合のヒッグスインフレーションシナリオについて、先行研究を詳しく調べた。

超新星ニュートリノの理論計算 (中里健一郎)

太陽より約10倍以上大きな質量を持つ恒星は、その進化の最期に超新星爆発を起こし、同時に大量のニュートリノを放出する。現在、この過程のシミュレーションに取り組み、超新星ニュートリノのスペクトルや時間変化（光度曲線）の計算を進めている。特に原始中性子星冷却期に放出されるニュートリノが核物質状態方程式にどのように依存するかに焦点を当てて研究しており、本年度は昨年度に引き続き飽和密度以下の領域で現れる非一様相の扱いに注目して、新たに中性子星の質量依存性を調べた。これまで、核統計平衡モデルを仮定すると密度汎関数モデルの場合と比べてニュートリノの平均エネルギーが下がることが分かっていたが、本年度の研究で光度曲線に見られる非一様相モデルの違いは中性子星質量による違いと区別可能なものであることが分かった。なお、これは主として鈴木英之氏（東京理科大）、住吉光介氏（沼津高専）らとの共同研究である。

ニュートリノ観測から探る超新星爆発とコンパクト天体形成 (中里健一郎)

大質量星の重力崩壊から放出されるニュートリノの観測によって、爆発メカニズムをはじめとする超新星内部の物理的プロセスや、その後形成される中性子星あるいはブラックホールの性質に迫ることができると期待されている。そこで理論・実験双方の研究者が協力して、現実的な検出器を想定した超新星ニュートリノ観測の検出シミュレーションに取り組んでいる。特に本年度は、解析的に記述された原始中性子星からのニュートリノ光度曲線モデルに基づいて、10%の精度で超新星のパラメータを推定できる新たな解析コード「SPECIAL BLEND」を開発し、GitHubにおいて公開した。これは主として諏訪雄大氏（東大）、小汐由介氏（岡山大）、原田了氏（理研）らとの共同研究である。

超新星背景ニュートリノのモデリングと検出予測 (中里健一郎)

過去の超新星爆発によって宇宙に放出されたニュートリノは、現在の地球で背景放射として観測することができると考えられており、これを超新星背景ニュートリノと呼ぶ。超新星背景ニュートリノはまだ検出されていないが、近い将来、検出が期待されているため、その理論モデルの構築と検出予測に取り組んでいる。本年度は、銀河の化学進化に基づく超新星及びブラックホール形成の赤方偏移に対する頻度史を用いて、背景ニュートリノスペクトルの詳細な計算と近い将来における検出可能性の評価を行なった。結果として得られた背景ニュートリノスペクトルを従来の典型的なスペクトルと比較したところ、低エネルギー領域では高赤方偏移天体を起源として、高エネルギー領域ではブラックホール形成天体を起源として、それぞれモデルの特徴を反映するフラックスの超過が見られた。なお、これは主として芦田洋輔氏 (ユタ大)、辻本拓司氏 (国立天文台) との共同研究である。

ニュートリノ検出器におけるニュートリノ原子核反応 (中里健一郎)

ニュートリノ検出器では、主に陽子による吸収 (逆ベータ崩壊)、電子との散乱、原子核との反応をとらえることによって、ニュートリノを検出する。なかでも原子核との反応断面積は原子核モデルにも依存するため不定性が大きい。現在、水チェレンコフ型検出器におけるニュートリノと酸素原子核との反応に注目して、殻模型に基づく反応断面積や事象数の評価を進めている。特に本年度は、水の中に含まれる ^{18}O 同位体との荷電および中性カレント反応を検討した。その結果、 ^{18}O は同位体比こそ 0.205% と小さいものの、反応閾値エネルギーが 1.66 MeV と低いこと、Gamow-Teller 遷移が大きな寄与を果たすことから、 ^{16}O と比較して低エネルギーのニュートリノに対する (ν_e, e^-) 反応の事象数が大きくなることが分かった。なお、これは主として作田誠氏 (岡山大)、鈴木俊夫氏 (日大) らとの共同研究である。

発表論文

《 原著論文 》

入門レベルの物理学の反転授業における ICT を活用した学習支援:

小島健太郎, 原田恒司

大学の物理教育, **29** (2023) 2, 61

Mass spectrum in a six-dimensional $SU(n)$ gauge theory on a magnetized torus:

Kentaro Kojima, Yuri Okubo, Carolina Sayuri Takeda,
Journal of High Energy Physics, **08** (2023) 083

Grand Gauge-Higgs Unification on T2/Z3 via Diagonal Embedding Method:
Kojima Kentaro, Kazunori Takenaga, Toshifumi Yamashita,
Physical Review D, **108** (2023) 035031

On representation matrices of boundary conditions in SU(n) gauge theories compactified on two-dimensional orbifolds:
Yoshiharu Kawamura, Eiji Kodaira, Kentaro Kojima and Toshifumi Yamashita,
Journal of High Energy Physics, **04** (2023) 113

Diffuse Neutrino Flux Based on the Rates of Core-collapse Supernovae and Black Hole Formation Deduced from a Novel Galactic Chemical Evolution Model:
Yosuke Ashida, Ken'ichiro Nakazato and Takuji Tsujimoto,
The Astrophysical Journal, **953** (2023) 151

Observing Supernova Neutrino Light Curves with Super-Kamiokande. IV. Development of SPECIAL BLEND: A New Public Analysis Code for Supernova Neutrinos:
Akira Harada, Yudai Suwa, Masayuki Harada, Yusuke Koshio, Masamitsu Mori, Fumi Nakanishi, Ken'ichiro Nakazato, Kohsuke Sumiyoshi and Roger A. Wendell,
The Astrophysical Journal, **954** (2023) 52

Neutrino-induced reactions on ^{18}O and implications of ^{18}O mixture in water Cherenkov detectors on supernova neutrino events:
Toshio Suzuki, Ken'ichiro Nakazato and Makoto Sakuda,
Nuclear Physics A, **1038** (2023) 122719

Life-time of Metastable Vacuum in String Theory and Trans-Planckian Censorship Conjecture:
Sohei Tsukahara,
Journal of High Energy Physics, **10** (2023) 109

《Proceedings》

Diffuse supernova neutrino background as a probe to explore the fate of stellar core collapse:

Yosuke Ashida, Ken'ichiro Nakazato and Takuji Tsujimoto,
38th International Cosmic Ray Conference (ICRC2023)

Development of analysis method for late-phase neutrino emission from the supernova in Super-Kamiokande:

Fumi Nakanishi, Akira Harada, Masayuki Harada, Yusuke Koshio, Masamitsu Mori, Ken'ichiro Nakazato, Kohsuke Sumiyoshi, Yudai Suwa and Roger A. Wendell,
XVIII International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP2023)

《その他の論文》

著書

講演

《海外での講演》

“Life-time of Metastable Vacuum in String Theory and Trans-Planckian Censorship Conjecture”

Sohei Tsukahara,

String Phenomenology 2023, Institute for Basic Science, Daejeon, 2023年7月4日

“Investigating the Catalytic Effect on Metastable Vacuum Decay in String Theory”

Sohei Tsukahara,

SUSY 2023, University of Southampton, Southampton, 2023年7月17日

《国内での講演》

「協調学習を中心とした入門レベルの物理学授業における学習姿勢の変化」

小島健太郎, 原田恒司,

2023年度日本物理教育学会年会 第39回物理教育研究大会, 新潟明訓中学校・高等学校,
2023年8月12日

「自然科学を通じた主体的学びと国際的視点」
大河内豊,
九州大学がやってきた in 東京, 日本橋, 2023 年 8 月 27 日

「Nonlinearly Charged Brane Shell as Over-extremal Object」
大河内豊, 塚原壮平,
第 129 回日本物理学会九州支部例会, 長崎大学, 2023 年 12 月 2 日

「連鎖的コンピュータ適応型テストの開発 力学概念指標は形成的評価で利用可能か？」
安田淳一郎, HULL Michael, 前直弘, 小島健太郎, 植松晴子, 中村琢,
日本科学教育学会第 47 回年会, 愛媛大学, 2023 年 9 月 17 日

”Vacuum stability through Wilson line phases in higher dimensional gauge theories with magnetic flux”,
Kentaro Kojima, Yuri Okubo, Carolina Sayuri Takeda,
日本物理学会第 78 回年次大会, 東北大学, 2023 年 9 月 18 日

「余剰次元 T^2 上の磁場を伴う 6 次元 $SU(n)$ ゲージ理論とその質量スペクトル」
小島健太郎, 大久保勇利, Carolina Sayuri Takeda,
日本物理学会第 78 回年次大会, 東北大学, 2023 年 9 月 18 日

「素粒子を学べるカードゲームの開発とアウトリーチの実践」
小島健太郎, 大久保勇利, Carolina Sayuri Takeda,
第 129 回日本物理学会九州支部例会, 長崎大学, 2023 年 12 月 2 日

「超新星ニュートリノ理論」
中里健一郎,
第一回瀬戸内ニュートリノ研究会, 豊島エスポワールパーク, 2023 年 8 月 20 日

「超新星背景ニュートリノと宇宙化学進化」
中里健一郎,
新学術「地下宇宙」第 10 回超新星ニュートリノ研究会, 岡山大学, 2024 年 3 月 1 日

「Burst and Cosmic Background Neutrinos from Core-Collapse Supernovae」
中里健一郎,

Unraveling the History of the Universe and Matter Evolution with Underground Physics
(UGAP2024), 東北大学, 2024年3月6日

「Nonlinearly Charged Brane Shell as Over-extremal Object」
塚原壮平,
原子核三者若手夏の学校, オリンピックセンター, 2023年8月19日

「Quantum Fluctuation around Instanton Configuration for Non-canonical systems」
塚原壮平,
日本物理学会第78回年次大会, 東北大学, 2023年9月17日

外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》
科学研究費補助金, 基盤 C (一般)
反転・相互作用型授業における熟達者型問題解決教材の開発と効果の検証
研究代表者: 原田恒司

科学研究費補助金, 基盤 C (一般)
真空間遷移における触媒効果による宇宙項問題の解決
研究代表者: 大河内豊

科学研究費補助金, 基盤 C (一般)
相互作用型授業における協調過程の多面的分析に基づく新たな教育手法の開発と評価
研究代表者: 小島健太郎

科学研究費補助金, 基盤 C (一般)
個々人の力学概念理解度の進展を捉える連鎖的コンピュータ適応型テストの開発
研究代表者: 安田淳一郎, 研究分担者: 小島健太郎

科学研究費補助金, 新学術領域研究 (計画班)
超新星ニュートリノと核物理・宇宙化学進化の理論研究
研究代表者: 鈴木英之, 研究分担者: 中里健一郎

科学研究費補助金, 基盤 C (一般)

大局的に描く中性子星形成過程の高密度核物質とニュートリノ放出の様相

研究代表者：中里健一郎

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

他大学での研究と教育

学部 4 年生卒業研究

修士論文

佐藤亮介 (指導教員：大河内豊)：特異点を含むバウンス解による 5 次元真空崩壊の解析

博士論文

大久保勇利 (指導教員：小島健太郎)：Exploring Higher-Dimensional Gauge Theory: A Model of Early Dark Energy and A Non-Abelian Gauge Theory with Magnetic Flux Background (高次元ゲージ理論の探究：Early Dark Energy の模型と背景磁場を伴う非可換ゲージ理論)

外国人留学生の受け入れ

Carolina Sayuri Takeda, 尹強

学外での学会活動

原田恒司:

日本物理学会第 78 期代議員

小島健太郎:

日本物理教育学会 物理教育, 編集委員

日本物理教育学会九州支部, 理事

受託研究・民間との共同研究

その他の活動と成果

大河内豊:

城南高校 出前授業「共創学部での学び」で講師を担当した (2023年7月)

小島健太郎, 田尾周一郎:

令和5年度福岡県高校生知の創造力育成セミナー事業実施協議会委員を担当した

小島健太郎:

中村学園女子高等学校のWWL(ワールド・ワイド・ラーニング)コンソーシアム構築支援事業のカリキュラムアドバイザーを担当した

小島健太郎:

福岡県修猷館高等学校 総合学習「出前授業」で講師を担当した (2023年11月)

小島健太郎:

りっかrika (サイエンス工房 koza, 沖縄県沖縄市) 主催のサイエンスカフェ「りっかRIKAサイエンス 第12回 そりゅうしカードゲームで遊ぼう!」で講師を担当した (2023年10月)

小島健太郎:

九州大学理学部同窓会の幹事を務めた (2023年度)

小島健太郎:

グローバルサイエンティストアワード“夢の翼”実行委員会が主催の「第6回 グローバルサイエンティストアワード“夢の翼”」にて審査員を務めた (2023年11月)

中里健一郎:

第101回 Q-AOS ブラウンバッグセミナー (九州大学アジア・オセアニア研究教育機構) において「超新星爆発とニュートリノ」と題して講演をおこなった (2023年6月)

中里健一郎:

新学術「地下宇宙」第10回超新星ニュートリノ研究会 (岡山大学) において世話人を

務めた (2024年2月29日～3月1日)

素粒子実験

研究室構成員

川越 清以 教授 東城 順治 教授
吉岡 瑞樹 (RCAPP) 准教授
音野 瑛俊 (RCAPP) 助教 調 翔平 助教 末原 大幹 助教 森津 学 助教
《 博士研究員 》
水野 貴裕 (学術研究員) Thomas Bouillaud (外国人特別研究員) 小川 真治
(JSPS 特別研究員 PD)
《 大学院 博士課程 》
竹内 佑甫 谷田 征輝
《 大学院 修士課程 》
川上 実言 樋口 義清 永江 航志 西原 雅志
星野 公邦 塩谷 漸 梅林 恵祐 Afiq Azraei
Zhou Yixing 吉川 大智 今村 幹 水取 雅登
梅林 恵祐
《 学部 卒業研究生 》
山本 雅大 田中 翔琉 東地 雄大 大倉野 広樹
平田 吾一 阿波 克典 土居 俊介
《 研究生 》
重田 宣拓

担当授業

力学基礎 (川越)、身の回りの物理学 B (吉岡)、原子核・高エネ実験 (吉岡)、基礎物理学実験 A・B (吉岡、調)、力学概論 (東城)、素粒子物理学 (東城)、国際科学特論 (東城)、物理ゼミ A・B (東城)、自然科学総合実験・基礎科学実習 (森津)、物理学実験 (森津)

研究・教育目標と成果

CERN 研究所 LHC 加速器における ATLAS 実験 (東城 順治、音野 瑛俊、調 翔平、森津 学、川上 実言、樋口 義清、Afiq Azraei、今村 幹)

スイス・ジュネーブ郊外にある欧州合同原子核研究機構 (CERN) の大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) において、ATLAS 実験を推進している。ヒッグス粒子をはじめとする素粒子標準理論を構成する既知の粒子の詳細測定、そして未知の粒子の発見による素粒子標準理論を超える物理の探索を目指している。LHC の重心系エネルギーは世界最高となる 13.6 TeV にまで増強され、現行計画の最終段階となる Run3 を 2022 年から開始した。

ATLAS 実験ではビーム衝突点から生成する粒子群が検出器に残す信号から、ビーム衝突点での素粒子反応を解析する。我々のグループは、荷電粒子の飛跡再構成に主要な役割を果たす内部飛跡検出器の 1 つであるシリコンストリップ検出器 (SemiConductor Tracker : SCT) の運転に取り組んできた。LHC の瞬間ビーム輝度が 2022 年から向上したものの、SCT の安定した運転を実現し、ATLAS 実験は 29.7 fb のデータ取得を達成した。SCT は放射線損傷に伴って性能が変化するため、動作条件を定期的に最適化する必要がある。そのアルゴリズムの効率化および堅牢化を完了させた。

LHC は 2026 年頃に Run3 を完遂し、大規模な増強を実施して次期計画となる HL-LHC (High Luminosity LHC) を 2029 年頃に開始する。ATLAS 実験も検出器の大幅なアップグレードが必要となる。我々のグループは、内部飛跡検出器のアップグレード、特に新型のシリコンピクセル検出器の開発・製作を担当している。2023 年度はシリコンピクセル検出器の冷却部の組立手法を改善するとともに、試験量産における評価手法の確立に取り組んだ。

ミューオン・電子転換過程の探索 (東城 順治、吉岡 瑞樹、森津 学、水野 貴裕、Thomas Bouillaud、西原 雅志、塩谷 漸、Zhou Yixing、吉川 大智)

茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC のハドロン実験施設において、ミューオンが電子に転換する過程を探索するため、COMET 実験 (J-PARC E21 実験) を国際共同研究で進めている。実験開始に向けて、世界最高強度のパルスミューオンビームを生成する実験施設の建設が進行中である。実験の第一段階 (Phase-I) では現在の実験上限値の 100 倍、第二段階 (Phase-II) では 10000 倍の事象発見感度を目指している。我々のグループは以下の検出器開発を推進している。(1) Phase-I におけるミューオンビームの研究、及び Phase-II の物理測定では、ストローチューブ飛跡検出器と電磁カロリメータ (ECAL) を用いる計画である。我々のグループは、ECAL 検出器の開

発を進めている。ECAL 検出器は、高計数率環境下で信号電子のエネルギーを測定し、トリガーを生成するために重要な役割を果たす。磁場がある真空中で動作させ、高いエネルギー分解能と速い時間応答を必要とするため、LYSO 結晶をアバランシェ・フォトダイオード (APD) で読み出す。今年度は実機に搭載する LYSO 結晶の品質管理を効率的に進めるために複数本の結晶を同時に試験できるセットアップを開発した。また、信号読出し回路の最終版が完成し、その性能評価を進めた。(2) Phase-I の物理測定では、円筒型ドリフトチェンバーとトリガー検出器 (CTH) を組み合わせた検出器システムが主要な役割を果たす。我々のグループは、CTH の開発を進めている。CTH は 256 枚のプラスチックシンチレータから構成され、Silicon PhotoMultiplier (SiPM) により信号を検出する。SiPM は、中性子による放射線損傷によって暗電流が増え、ノイズによるトリガーを発行してしまう。暗電流の抑制には冷却が効果的であるため、シンチレータからの信号を光ファイバーによって SiPM まで輸送し、SiPM は隣接する放射線遮蔽領域に設置して冷却する。今年度は、SiPM の冷却機構の開発を進め、実機に搭載するシンチレータの品質管理手法を確立した。

ミューオン異常磁気モーメント・電気双極子モーメントの測定 (東城順治、吉岡 瑞樹、調 翔平、末原 大幹、小川 真治、竹内 佑甫、梅林 恵祐、水取 雅登)

茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC の物質・生命科学実験施設 (MLF) において、ミューオンの異常磁気モーメント ($g-2$) と電気双極子モーメント (EDM) を測定するため、J-PARC E34 実験を国際共同研究で進めている。 $g-2$ の測定は、米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) の E821 実験が 0.54 ppm の精度で素粒子標準模型 (SM) から 3.3σ のずれを発表し、その結果は SM を超える物理 (BSM) の探索で重要な位置を占めている。その後、米国フェルミ国立加速器研究所 (FNAL) の E989 実験が BNL と同じ手法を用いて追試を行い、いまや実験値と SM との差は 5σ 以上となっている。また、EDM の測定は、BNL E821 実験が $1.9 \times 10^{-19} e \cdot \text{cm}$ の上限値を与えた。有限の EDM は時間反転対称性を破るため、CPT 定理を仮定すれば CP 非保存を意味し、それを生み出す BSM の存在を示唆する。本実験では、低エミッタンスのミューオンビームを生成・加速し、収束電場を用いずに超高精度磁場中にミューオンを蓄積する手法を用いる。その手法により、 $g-2$ を 0.1 ppm の精度で、EDM を $10^{-21} e \cdot \text{cm}$ の感度で、それぞれを分離して測定する計画である。我々のグループは、本実験に用いるシリコンストリップ検出器とミューオン線形加速器を開発している。なお、検出器の開発においては、基幹教育院の山中隆志氏とも共同して研究開発を行っている。

シリコンストリップ検出器の構成要素として、シリコンセンサーはその開発を完了し、量産を継続的に行っている。読み出し ASIC は 実機仕様の SliT128D の量産を完

了しており、品質保証検査を本年度中に完了させた。ASIC を搭載する基板は実装度が高い多層リジッド基板を用いる。本年度は、基板への ASIC の実装方法の検討および試作した基板試作機の性能評価を行った。ベーン製作におけるセンサーの接着では、 $1\ \mu\text{m}$ の位置精度を要求しており、難易度が高い。今年度は、検出器モジュールの高位置精度での組み立て方法の検討を行った。

冷却ミュオンビームの開発は、本実験を原理的に成功させる最も重要な要素の一つである。開発中の冷却ミュオン源から供給される低エミッタンスのミュオンビームを 3 段階の線形加速器を用いて加速する計画である。第 1 段階には RFQ 加速器、第 2 段階は上流側から IH-DTL 加速器と DAW 加速器から構成し、第 3 段階には電子加速器を用いる。これらの加速器のうち、第 2 段階の DAW 加速器の開発を行っている。製作した低電力モデルの固有状態の周波数と電場分布の測定を完了し、ビーム輸送をシミュレーションも用いた DAW 加速器の加速空洞、及び、それらを接続して駆動するためのブリッジカプラーの設計を平行して進めきた。本年度は DAW 加速器の加速空洞を試作し、性能評価を行った。

中性子を用いた基礎物理 (吉岡 瑞樹、谷田 征輝、星野 公邦)

我々は茨城県東海村の J-PARC 加速器を用いて中性子崩壊寿命を高精度で測定する実験を推進している。中性子寿命を導出するためには入射中性子の流量と β 崩壊の量を知る必要があるが、これまで行われてきた実験では中性子と蓄積容器壁面との相互作用や流量に関する系統誤差が問題となっていた。これに対し、我々の実験では入射中性子流量と β 崩壊電子をガス検出器である Time Projection Chamber (TPC) で同時測定することにより、これまでの実験に伴っていた系統誤差を回避することが可能となる。我々は、この新たな手法を用いて 0.1% の精度で中性子の寿命を測定することを目指している。

本年度はデータ収集を引き続き行い、また、取得データの解析を行なった。データ解析より、検出器動作ガスで散乱された中性子が検出器壁面の LiF に衝突することにより放出されたガンマ線が叩き出すコンプトン電子が主要な背景事象（以下、ガス起因事象）であることが判明している。そこで、ガス起因事象を低減するために、ソレノイド磁場を用いた新規実験の検討を行っている。昨年度までに、作製した検出器実機とソレノイド磁石との統合試験を高エネルギー加速器研究機構にて行い、良好な結果が得られている。本年度は、実験中にエネルギー較正を可能とするため、Fe 線源と超音波モーターを組み合わせた、エネルギー較正システムの開発を行った。また、信号読み出しのための MWPC に放電現象が見られていたため、その対策を集中的に行った。

発表論文

《 原著論文 》

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Differential $t\bar{t}$ cross-section measurements using boosted top quarks in the all-hadronic final state with 139 fb^{-1} of ATLAS data”, JHEP 04 (2023) 80.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the total and differential Higgs boson production cross-sections at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector by combining the $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ and $H \rightarrow \gamma\gamma$ decay channels”, JHEP 05 (2023) 028.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of muon pairs produced via $\gamma\gamma$ scattering in non-ultraperipheral Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector”, Phys. Rev. C 107 (2023) 054907.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of the suppression and correlations of dijets in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}}=5.02 \text{ TeV}$ ”, Phys. Rev. C 107 (2023) 054908.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of substructure-dependent jet suppression in Pb+Pb collisions at 5.02 TeV with the ATLAS detector”, Phys. Rev. C 107 (2023) 054909.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Correlations between flow and transverse momentum in Xe+Xe and Pb+Pb collisions at the LHC with the ATLAS detector: a probe of the heavy-ion initial state and nuclear deformation”, Phys. Rev. C 107 (2023) 054910.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Production of $\Upsilon(nS)$ mesons in Pb+Pb and pp collisions at 5.02 TeV ”, Phys. Rev. C 107 (2023) 054912.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the nuclear modification factor of b -jets in 5.02 TeV Pb+Pb collisions with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C 83 (2023) 438.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the total cross section and ρ -parameter from elastic scattering in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, *Eur. Phys. J. C* 83 (2023) 441.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for flavour-changing neutral-current couplings between the top quark and the photon with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 13$ TeV”, *Phys. Lett. B* 842 (2023) 137379.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the polarisation of W bosons produced in top-quark decays using dilepton events at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS experiment”, *Phys. Lett. B* 843 (2023) 137829.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the top-quark mass using a leptonic invariant mass in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, *JHEP* 06 (2023) 019.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy resonances decaying into a Z or W boson and a Higgs boson in final states with leptons and b -jets in 139 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, *JHEP* 06 (2023) 016.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for direct pair production of sleptons and charginos decaying to two leptons and neutralinos with mass splittings near the W -boson mass in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector”, *JHEP* 06 (2023) 031.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “A search for new resonances in multiple final states with a high transverse momentum Z boson in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector”, *JHEP* 06 (2023) 036.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of four-top-quark production in the multilepton final state with the ATLAS detector”, *Eur. Phys. J. C* 83 (2023) 496.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Constraints on spin-0 dark matter mediators and invisible Higgs decays using ATLAS 13 TeV pp collision data with two top quarks and missing transverse momentum in the final state”, *Eur. Phys. J. C* 83 (2023) 503.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of electroweak $Z(\nu\bar{\nu})\gamma jj$ production and limits on anomalous quartic gauge couplings in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, JHEP 06 (2023) 082.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Cross-section measurements for the production of a Z boson in association with high-transverse-momentum jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, JHEP 06 (2023) 080.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Constraining the Higgs boson self-coupling from single- and double-Higgs production with the ATLAS detector using pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV”, Phys. Lett. B 843 (2023) 137745.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of gauge boson joint-polarisation states in $W^\pm Z$ production from pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, Phys. Lett. B 843 (2023) 137895.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Searches for new phenomena in events with two leptons, jets, and missing transverse momentum in 139 fb^{-1} of $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C 83 (2023) 515.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs boson pair production in association with a vector boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C 83 (2023) 519.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of observables sensitive to colour reconnection in $t\bar{t}$ events with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 13$ TeV”, Eur. Phys. J. C 83 (2023) 518.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the Higgs boson mass in the $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ decay channel using 139 fb^{-1} of $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions recorded by the ATLAS detector at the LHC”, Phys. Lett. B 843 (2023) 137880.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair-production of vector-like quarks in pp collision events at $\sqrt{s} = 13$ TeV with at least one leptonically decaying Z boson

and a third-generation quark with the ATLAS detector”, *Phys. Lett. B* 843 (2023) 138019.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for flavour-changing neutral current interactions of the top quark and the Higgs boson in events with a pair of τ -leptons in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, *JHEP* 06 (2023) 155.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $t\bar{t}$ production cross-section in pp collisions at $\sqrt{s} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector”, *JHEP* 06 (2023) 138.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for light long-lived neutral particles that decay to collimated pairs of leptons or light hadrons in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, *JHEP* 06 (2023) 153.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy, long-lived, charged particles with large ionisation energy loss in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS experiment and the full Run 2 dataset”, *JHEP* 06 (2023) 158.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the charge asymmetry in top-quark pair production in association with a photon with the ATLAS experiment”, *Phys. Lett. B* 843 (2023) 137848.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair-produced scalar and vector leptoquarks decaying into third-generation quarks and first- or second-generation leptons in pp collisions with the ATLAS detector”, *JHEP* 06 (2023) 188.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Exclusive dielectron production in ultraperipheral Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02$ TeV with ATLAS”, *JHEP* 06 (2023) 182.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of $Z\gamma\gamma$ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, *Eur. Phys. J. C* 83 (2023) 539.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for excited τ -leptons and leptoquarks in the final state with τ -leptons and jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, *JHEP* 06 (2023) 199.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of single top-quark production in the s-channel in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, JHEP 06 (2023) 191.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for long-lived, massive particles in events with displaced vertices and multiple jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, JHEP 06 (2023) 200.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in final states with photons, jets and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, JHEP 07 (2023) 021.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the CP properties of Higgs boson interactions with τ -leptons with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C 83 (2023) 563.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for supersymmetry in final states with missing transverse momentum and three or more b -jets in 139 fb^{-1} of proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C 83 (2023) 561.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for leptonic charge asymmetry in $t\bar{t}W$ production in final states with three leptons at $\sqrt{s} = 13$ TeV”, JHEP 07 (2023) 033.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for resonant and non-resonant Higgs boson pair production in the $b\bar{b}\tau^+\tau^-$ decay channel using 13 TeV pp collision data from the ATLAS detector”, JHEP 07 (2023) 040.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Combination of searches for invisible decays of the Higgs boson using 139 fb^{-1} of proton-proton collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV collected with the ATLAS experiment”, Phys. Lett. B 842 (2023) 137963.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of $Z\gamma$ +jets differential cross sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, JHEP 07 (2023) 72.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Charged-hadron production in pp , $p+\text{Pb}$, $\text{Pb}+\text{Pb}$, and $\text{Xe}+\text{Xe}$ collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5$ TeV with the ATLAS detector at the LHC”, JHEP 07 (2023) 074.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Inclusive-photon production and its dependence on photon isolation in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using 139 fb^{-1} of ATLAS data”, JHEP 07 (2023) 086.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Determination of the strong coupling constant from transverse energy–energy correlations in multijet events at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, JHEP 07 (2023) 85.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the properties of Higgs boson production at $\sqrt{s} = 13$ TeV in the $H \rightarrow \gamma\gamma$ channel using 139 fb^{-1} of pp collision data with the ATLAS experiment”, JHEP 07 (2023) 088.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a new Z' gauge boson in 4μ events with the ATLAS experiment”, JHEP 07 (2023) 90.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter produced in association with a single top quark and an energetic W boson in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C 83 (2023) 603.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for doubly charged Higgs boson production in multi-lepton final states using 139 fb^{-1} of proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C 83 (2023) 605.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter produced in association with a dark Higgs boson decaying into W^+W^- in the one-lepton final state at $\sqrt{s} = 13$ TeV using 139 fb^{-1} of pp collisions recorded with the ATLAS detector”, JHEP 07 (2023) 116.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for high-mass $W\gamma$ and $Z\gamma$ resonances using hadronic W/Z boson decays from 139 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, JHEP 07 (2023) 125.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Inclusive and differential cross-sections for dilepton $t\bar{t}$ production measured in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector”, JHEP 07 (2023) 141.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark photons from Higgs boson decays via ZH production with a photon plus missing transverse momentum signature from pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, JHEP 07 (2023) 133.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of exclusive pion pair production in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C 83 (2023) 627.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for resonant $WZ \rightarrow \ell\nu\ell'\ell'$ production in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C 83 (2023) 633.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search in diphoton and dielectron final states for displaced production of Higgs or Z bosons with the ATLAS detector in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions”, Phys. Rev. D 108 (2023) 012012.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for boosted diphoton resonances in the 10 to 70 GeV mass range using 138 fb^{-1} of 13 TeV pp collisions with the ATLAS detector”, JHEP 07 (2023) 155.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Searches for lepton-flavour-violating decays of the Higgs boson into $e\tau$ and $\mu\tau$ in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector”, JHEP 07 (2023) 166.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Model-independent search for the presence of new physics in events including $H \rightarrow \gamma\gamma$ with $\sqrt{s} = 13$ TeV pp data recorded by the ATLAS detector at the LHC”, JHEP 07 (2023) 176.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a new scalar resonance in flavour-changing neutral-current top-quark decays $t \rightarrow qX$ ($q = u, c$), with $X \rightarrow b\bar{b}$, in proton-

proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, JHEP 07 (2023) 199.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in multi-body invariant masses in events with at least one isolated lepton and two jets using $\sqrt{s} = 13$ TeV proton-proton collision data collected by the ATLAS detector”, JHEP 07 (2023) 202.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “A search for heavy Higgs bosons decaying into vector bosons in same-sign two-lepton final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, JHEP 07 (2023) 200.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Combination of inclusive top-quark pair production cross-section measurements using ATLAS and CMS data at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV”, JHEP 07 (2023) 213.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “ATLAS flavour-tagging algorithms for the LHC Run 2 pp collision dataset”, Eur. Phys. J. C 83 (2023) 681.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of cross-sections for production of a Z boson in association with a flavor-inclusive or doubly b -tagged large-radius jet in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS experiment”, Phys. Rev. D 108 (2023) 012022.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Studies of the muon momentum calibration and performance of the ATLAS detector with pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV”, Eur. Phys. J. C 83 (2023) 686.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for an axion-like particle with forward proton scattering in association with photon pairs at ATLAS”, JHEP 07 (2023) 234.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Study of the CP property of the Higgs boson to electroweak boson coupling in the VBF $H \rightarrow \gamma\gamma$ channel with the ATLAS detector”, Phys. Rev. Lett. 131 (2023) 061802.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy neutral leptons in decays of W

bosons using a dilepton displaced vertex in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector”, Phys. Rev. Lett. 131 (2023) 061803.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of Higgs boson production by gluon–gluon fusion and vector-boson fusion using $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ decays in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, Phys. Rev. D 108 (2023) 032005.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of the suppression and correlations of dijets in Xe+Xe collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ TeV”, Phys. Rev. C 108 (2023) 024906.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair-produced vector-like top and bottom partners in events with large missing transverse momentum in pp collisions with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C 83 (2023) 719.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of W^+W^- production in decay topologies inspired by searches for electroweak supersymmetry”, Eur. Phys. J. C 83 (2023) 718.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for third-generation vector-like leptons in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, JHEP 07 (2023) 118.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the production of a W boson in association with a charmed hadron in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, Phys. Rev. D 108 (2023) 032012.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Calibration of the light-flavour jet mistagging efficiency of the b -tagging algorithms with Z +jets events using 139 fb^{-1} of ATLAS proton-proton collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV”, Eur. Phys. J. C 83 (2023) 728.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Evidence for the charge asymmetry in $pp \rightarrow t\bar{t}$ production at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, JHEP 08 (2023) 077.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Strong constraints on jet quenching in centrality-dependent p +Pb collisions at 5.02 TeV from ATLAS”, Phys. Rev. Lett. 131 (2023)

072301.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the inclusive $t\bar{t}$ production cross section in the lepton+jets channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector using support vector machines”, Phys. Rev. D 108 (2023) 032014.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for displaced photons produced in exotic decays of the Higgs boson using 13 TeV pp collisions with the ATLAS detector”, Phys. Rev. D 108 (2023) 032016.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the charged-lepton-flavor-violating decay $Z \rightarrow e\mu$ in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, Phys. Rev. D 108 (2023) 032015.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for $t\bar{t}H/A \rightarrow t\bar{t}t\bar{t}$ production in the multilepton final state in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, JHEP 07 (2023) 203.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “New techniques for jet calibration with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C 83 (2023) 761.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for flavor-changing neutral-current couplings between the top quark and the Z boson with proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, Phys. Rev. D 108 (2023) 032019.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a light charged Higgs boson in $t \rightarrow H^\pm b$ decays, with $H^\pm \rightarrow cb$, in the lepton+jets final state in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, JHEP 09 (2023) 004.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of differential cross sections of Higgs boson production through gluon fusion in the $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ final state at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C 83 (2023) 774.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for nonresonant pair production of Higgs bosons in the $b\bar{b}b\bar{b}$ final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detec-

tor”, Phys. Rev. D 108 (2023) 052003.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Searches for exclusive Higgs and Z boson decays into a vector quarkonium state and a photon using 139 fb^{-1} of ATLAS $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ proton–proton collision data”, Eur. Phys. J. C 83 (2023) 781.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pairs of muons with small displacements in pp collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector”, Phys. Lett. B 846 (2023) 138172.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Majorana neutrinos in same-sign WW scattering events from pp collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ ”, Eur. Phys. J. C 83 (2023) 824.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Anomaly detection search for new resonances decaying into a Higgs boson and a generic new particle X in hadronic final states using $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ pp collisions with the ATLAS detector”, Phys. Rev. D 108 (2023) 052009.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Comparison of inclusive and photon-tagged jet suppression in 5.02 TeV Pb+Pb collisions with ATLAS”, Phys. Lett. B 846 (2023) 138154.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for single production of vector-like T quarks decaying into Ht or Zt in pp collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector”, JHEP 08 (2023) 153.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter produced in association with a Higgs boson decaying to tau leptons at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector”, JHEP 09 (2023) 189.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $B_s^0 \rightarrow \mu\mu$ Effective Lifetime with the ATLAS Detector”, JHEP 09 (2023) 199.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for leptoquarks decaying into the $b\tau$

final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, JHEP 10 (2023) 001.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a new heavy scalar particle decaying into a Higgs boson and a new scalar singlet in final states with one or two light leptons and a pair of τ -leptons with the ATLAS detector”, JHEP 10 (2023) 009.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of multijet event isotropies using optimal transport with the ATLAS detector”, JHEP 10 (2023) 060.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Fiducial and differential cross-section measurements for the vector-boson-fusion production of the Higgs boson in the $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ decay channel at 13 TeV with the ATLAS detector”, Phys. Rev. D 108 (2023) 072003.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of the $\gamma\gamma \rightarrow \tau\tau$ process in Pb+Pb collisions and constraints on the τ -lepton anomalous magnetic moment with the ATLAS detector”, Phys. Rev. Lett. 131 (2023) 151802.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for lepton-flavour violation in high-mass dilepton final states using 139 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, JHEP 10 (2023) 082.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for periodic signals in the dielectron and diphoton invariant mass spectra using 139 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, JHEP 10 (2023) 079.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of an excess of di-charmonium events in the four-muon final state with the ATLAS detector”, Phys. Rev. Lett. 131 (2023) 151902.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Evidence of off-shell Higgs boson production from ZZ leptonic decay channels and constraints on its total width with the ATLAS detector”, Phys. Lett. B 846 (2023) 138223.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the Sensitivity of Two-Particle Correlations in pp Collisions to the Presence of Hard Scatterings”, Phys. Rev. Lett. 131 (2023) 162301.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the cross-sections of the electroweak and total production of a $Z\gamma$ pair in association with two jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, Phys. Lett. B 846 (2023) 138222.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of suppression of large-radius jets and its dependence on substructure in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector”, Phys. Rev. Lett. 131 (2023) 172301.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of single-top-quark production in association with a photon using the ATLAS detector”, Phys. Rev. Lett. 131 (2023) 181901.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Luminosity determination in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector at the LHC”, Eur. Phys. J. C 83 (2023) 982.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for exclusive Higgs and Z boson decays to $\omega\gamma$ and Higgs boson decays to $K^*\gamma$ with the ATLAS detector”, Phys. Lett. B 847 (2023) 138292.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Fast b -tagging at the high-level trigger of the ATLAS experiment in LHC Run 3”, JINST 18 (2023) P11006.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy long-lived multi-charged particles in the full LHC Run 2 pp collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector”, Phys. Lett. B 847 (2023) 138316.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the Higgs boson mass with $H \rightarrow \gamma\gamma$ decays in 140 fb^{-1} of $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector”, Phys. Lett. B 847 (2023) 138315.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for magnetic monopoles and stable parti-

cles with high electric charges in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector”, JHEP 11 (2023) 112.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for direct production of winos and higgsinos in events with two same-charge leptons or three leptons in pp collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, JHEP 11 (2023) 150.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for single vector-like B quark production and decay via $B \rightarrow bH(b\bar{b})$ in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, JHEP 11 (2023) 168.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for non-resonant production of semi-visible jets using Run 2 data in ATLAS”, Phys. Lett. B 848 (2024) 138324.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair production of third-generation leptoquarks decaying into a bottom quark and a τ -lepton with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C 83 (2023) 1075.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a new pseudoscalar decaying into a pair of muons in events with a top-quark pair at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, Phys. Rev. D 108 (2023) 092007.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of the reconstruction of large impact parameter tracks in the inner detector of ATLAS”, Eur. Phys. J. C 83 (2023) 1081.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Tools for estimating fake/non-prompt lepton backgrounds with the ATLAS detector at the LHC”, JINST 18 (2023) T11004.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $t\bar{t}$ cross section and its ratio to the Z production cross section using pp collisions at $\sqrt{s} = 13.6$ TeV with the ATLAS detector”, Phys. Lett. B 848 (2024) 138376.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for vector-boson resonances decaying into a top quark and a bottom quark using pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the

ATLAS detector”, JHEP 12 (2023) 073.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy Higgs bosons with flavour-violating couplings in multi-lepton plus b -jets final states in pp collisions at 13 TeV with the ATLAS detector”, JHEP 12 (2023) 081.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Pursuit of paired dijet resonances in the Run 2 dataset with ATLAS”, Phys. Rev. D 108 (2023) 112005.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of $W\gamma\gamma$ triboson production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, Phys. Lett. B 848 (2024) 138400.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Evidence of pair production of longitudinally polarised vector bosons and study of CP properties in $ZZ \rightarrow 4\ell$ events with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 13$ TeV”, JHEP 12 (2023) 107.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the $Z\gamma$ decay mode of new high-mass resonances in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, Phys. Lett. B 848 (2024) 138394.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark photons in rare Z boson decays with the ATLAS detector”, Phys. Rev. Lett. 131 (2023) 251801.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy Majorana or Dirac neutrinos and right-handed W gauge bosons in final states with charged leptons and jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C 83 (2023) 1164.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Combined measurement of the Higgs boson mass from the $H \rightarrow \gamma\gamma$ and $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ decay channels with the ATLAS detector using $\sqrt{s} = 7, 8$ and 13 TeV pp collision data”, Phys. Rev. Lett. 131 (2023) 251802.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for direct production of electroweakinos in final states with one lepton, jets and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector”, JHEP 12 (2023) 167.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for flavor-changing neutral tqH interactions with $H \rightarrow \gamma\gamma$ in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector”, JHEP 12 (2023) 195.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Differential cross-section measurements of the production of four charged leptons in association with two jets using the ATLAS detector”, JHEP 01 (2024) 004.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Evidence for the Higgs boson decay to a Z boson and a photon at the LHC”, Phys. Rev. Lett. 132 (2024) 021803.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Studies of new Higgs boson interactions through nonresonant HH production in the $b\bar{b}\gamma\gamma$ final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, JHEP 01 (2024) 066.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of $WZ\gamma$ Production in pp Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS Detector”, Phys. Rev. Lett. 132 (2024) 021802.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $H \rightarrow \gamma\gamma$ and $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ cross-sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 13.6$ TeV with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C 84 (2024) 78.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Probing the CP nature of the top-Higgs Yukawa coupling in $t\bar{t}H$ and tH events with $H \rightarrow b\bar{b}$ decays using the ATLAS detector at the LHC”, Phys. Lett. B 849 (2024) 138469.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance and calibration of quark/gluon-jet taggers using 140 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, Chinese Phys. C 48 (2024) 023001.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Electron and photon energy calibration with the ATLAS detector using LHC Run 2 data”, JINST 19 (2024) P02009.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for non-resonant Higgs boson pair production in the $2b + 2\ell + E_T^{\text{miss}}$ final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 13\text{TeV}$ with the ATLAS detector”, JHEP 02 (2024) 037.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair production of squarks or gluinos decaying via sleptons or weak bosons in final states with two same-sign or three leptons with the ATLAS detector”, JHEP 02 (2024) 107.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for top-philic heavy resonances in pp collisions at $\sqrt{s} = 13\text{ TeV}$ with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C 84 (2024) 157.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Resonant Production of Dark Quarks in the Dijet Final State with the ATLAS Detector”, JHEP 02 (2024) 128.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the production cross-section of J/ψ and $\psi(2S)$ mesons in pp collisions at $\sqrt{s} = 13\text{ TeV}$ with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C 84 (2024) 169.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in two-body invariant mass distributions using unsupervised machine learning for anomaly detection at $\sqrt{s} = 13\text{ TeV}$ with the ATLAS detector”, Phys. Rev. Lett. 132 (2024) 081801.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the decay of the Higgs boson to a Z boson and a light pseudoscalar particle decaying to two photons”, Phys. Lett. B 848 (2024) 138536.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a CP-odd Higgs boson decaying into a heavy CP-even Higgs boson and a Z boson in the $\ell^+\ell^-t\bar{t}$ and $\nu\bar{\nu}b\bar{b}$ final states using 140 fb^{-1} of data collected with the ATLAS detector”, JHEP 02 (2024) 197.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Study of $Z \rightarrow l\ell\gamma$ decays at $\sqrt{s} = 8\text{ TeV}$ with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C 84 (2024) 195.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for quantum black hole production in lepton+jet final states using proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13\text{ TeV}$ with the ATLAS

detector”, Phys. Rev. D 109 (2024) 032010.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Deep generative models for fast photon shower simulation in ATLAS”, Comput Softw Big Sci 8, 7 (2024).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the centrality dependence of the dijet yield in p +Pb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 8.16$ TeV with the ATLAS detector”, Phys. Rev. Lett. 132 (2024) 102301.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “A precise measurement of the Z-boson double-differential transverse momentum and rapidity distributions in the full phase space of the decay leptons with the ATLAS experiment at $\sqrt{s} = 8$ TeV”, Eur. Phys. J. C 84 (2024) 315.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena with top-quark pairs and large missing transverse momentum using 140 fb^{-1} of pp collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, JHEP 03 (2024) 139.

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Study of High-Transverse-Momentum Higgs Boson Production in Association with a Vector Boson in the $qqbb$ Final State with the ATLAS Detector”, Phys. Rev. Lett. 132 (2024) 131802.

T. Okudaira, T. Yoshioka *et al.*, “Angular distribution of γ rays from a neutron induced p -wave resonance of Xe 132”, Phys. Rev. C **107**, 054602 (2023).

《その他の論文》

著書

講演

《海外での講演》

“Status of g-2/EDM experiment at J-PARC”,

S. Ogawa,
CLFV2023, Heidelberg, Germany, 20-22 June, 2023

“Muon g-2/EDM experiment at J-PARC”,
T. Yoshioka,
HPNP2023, Osaka, Japan, 5-9 June, 2023

《国内での講演》

「HL-LHC ATLAS 実験用新型シリコンピクセル検出器の冷却部組み立て工程の量産
へ向けた評価」、
樋口義清、
日本物理学会第 2024 年春季大会、2024 年 3 月、オンライン

「Development and Commissioning of Quality Control/Assessment Testing Setups for
the Production of ATLAS ITk Pixel Modules」、
Afiq Azraei、
日本物理学会第 2024 年春季大会、2024 年 3 月、オンライン

「高輝度 LHC における ATLAS 実験用シリコンピクセル検出器の試験量産を通じた組
立精度の評価」、
樋口義清、
日本物理学会第 78 回年次大会、2023 年 9 月、東北大学

「LHC における新粒子や新現象探索の最前線」、
音野瑛俊、
日本物理学会第 78 回年次大会、2023 年 9 月、東北大学

「COMET 実験の電磁カロリメーターに用いる LYSO 結晶の品質管理」、
塩谷 漸、
日本物理学会 2024 年春季大会、2024 年 3 月、オンライン

「COMET 実験用電磁カロリメーターの検出器モジュールの開発」、
吉川 大智、
日本物理学会 2024 年春季大会、2024 年 3 月、オンライン

「COMET 実験トリガー検出器で用いる MPPC 冷却装置の開発研究」、水野 貴裕、
日本物理学会 2024 年春季大会、2024 年 3 月、オンライン

「COMET 実験トリガー検出器で用いるシンチレータの品質管理」、西原 雅志、
日本物理学会 2024 年春季大会、2024 年 3 月、オンライン

「Performance Evaluation of the Readout Electronics Boards for ECAL system in
COMET Phase I Experiment」、David Zhou、
日本物理学会 2024 年春季大会、2024 年 3 月、オンライン

「COMET 実験トリガー検出器で用いる MPPC 冷却装置の開発」、
水野 貴裕、
日本物理学会 第 78 回年次大会、2023 年 9 月、東北大学

「Development and Production of the Electromagnetic Calorimeter Module for the
COMET Phase I Experiment」、
David Zhou、日本物理学会 第 78 回年次大会、
2023 年 9 月、東北大学

「J-PARC muon g-2/EDM 実験：ミューオン EDM 探索のための崩壊陽電子飛跡を用
いたセンサー位置合わせ」、
小川 真治、
日本物理学会 2024 年春季大会、2024 年 3 月、オンライン

「J-PARC muon g-2/EDM 実験：シリコンストリップ検出器モジュールの組み立てに
おける接着剤の塗布システムの構築と性能評価」、
水取 雅登、
日本物理学会 2024 年春季大会、2024 年 3 月、オンライン

「J-PARC muon g-2/EDM 実験：陽電子飛跡検出器プロトタイプモジュールを用いた
実験環境下でのノイズ評価」、梅林 恵祐、
日本物理学会 2024 年春季大会、2024 年 3 月、オンライン

「J-PARC muon g-2/EDM 実験：陽電子飛跡検出器モジュールのプロトタイプ製作」、

梅林 恵祐、

日本物理学会 第 78 回年次大会、2023 年 9 月、東北大学

「J-PARC muon g-2/EDM 実験：ミューオン EDM 探索のための精密なセンサーの位置合わせ」、

小川 真治、日本物理学会 第 78 回年次大会、

2023 年 9 月、東北大学

「J-PARC muon g-2/EDM 実験における精密な三次元ビーム入射のための蓄積ビームモニター」、小川 真治、

第 20 回 日本加速器学会年会、2023 年 8 月、日大理工学部 船橋キャンパス

「ソレノイド磁石を用いた中性子寿命測定実験のための検出器開発」、

谷田征輝、

日本物理学会第 2024 年春季大会、2024 年 3 月、オンライン

「ソレノイド磁石を用いた中性子寿命測定実験のための検出器開発～TPC の性能評価～」、

谷田征輝、

日本物理学会第 78 回年次大会、2023 年 9 月、東北大学

「J-PARC/BL05 における中性子寿命測定実験：高統計データを用いた信号抽出効率における系統誤差評価」、

細川律也、

日本物理学会第 78 回年次大会、2023 年 9 月、東北大学

外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》

文部省科学研究費補助金、基盤研究 (S)

大強度ミュー粒子源で迫る荷電レプトンの世代混合と新物理の探索

研究代表者：東城順治

文部省科学研究費補助金、特別推進研究

大強度ミュー粒子源で挑む荷電レプトンフレーバ研究
研究分担者：東城順治（研究代表者 大阪大学 青木正治）

文部省科学研究費補助金、基盤研究(S)
ヒッグス粒子稀反応の測定から探る標準模型を超える物理
研究分担者：東城順治（研究代表者 高エネルギー加速器研究機構 戸本誠）

文部省科学研究費補助金、基盤研究(A)
ソレノイド磁場で実現する新しい手法による中性子寿命問題の解明
研究代表者：吉岡瑞樹

文部省科学研究費補助金、特別推進研究
ミュオン異常磁気能率・電気双極子能率の超精密測定
研究分担者：吉岡瑞樹（研究代表者 高エネルギー加速器研究機構 戸本誠）

文部省科学研究費補助金、基盤研究(A)
中性子寿命問題の解決 一偏極中性子崩壊非対称を用いた事象選別の高度化—
研究分担者：吉岡瑞樹（研究代表者 高エネルギー加速器研究機構 三島賢二）

文部省科学研究費補助金、基盤研究(B)
水素吸蔵ナノ粒子・中性子散乱によるサブミクロン領域での未知相互作用の探索
研究分担者：吉岡瑞樹（研究代表者 大阪大学 嶋達志）

文部省科学研究費補助金、基盤研究(B)
FASER 実験における未開拓エネルギー領域でのニュートリノ研究
研究代表者：音野瑛俊

文部省科学研究費補助金、基盤研究(B)
飛跡検出とトリガーの先鋭化による高エネルギー階層開拓の革新
研究分担者：音野瑛俊（研究代表者 高エネルギー加速器研究機構 生出秀行）

文部省科学研究費補助金、基盤研究(B)
LHC 超前方における高エネルギー3世代ニュートリノの研究
研究分担者：音野瑛俊（研究代表者 九州大学 有賀智子）

文部省科学研究費補助金、基盤研究 (B)

電子・陽電子線形加速器を用いたアクシオンの粒子の探索

研究分担者：音野瑛俊（研究代表者 高エネルギー加速器研究機構 田窪洋介）

文部省科学研究費補助金、学術変革領域研究 (A)

深層学習による粒子再構成と測定器開発への応用

研究代表者：末原大幹

文部省科学研究費補助金、若手研究

μ 粒子異常磁気能率精密測定のための蓄積領域ビームプロファイル測定器

研究代表者：小川真治

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

日本学術振興会、研究拠点形成事業

ミューオン素粒子物理学の国際研究拠点形成

日本側コーディネーター：東城順治

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

小川真治（日本学術振興会 特別研究員 PD）

Thomas Bouillaud（日本学術振興会 外国人特別研究員）

他大学での研究と教育

学部 4 年生卒業研究

修士論文

梅林恵祐：(指導教員 吉岡瑞樹)

J-PARC muon g-2/EDM 実験における陽電子飛跡検出器の試作機製作とノイズ評価

塩谷漸：(指導教員 東城順治)

COMET 実験の電磁カロリメーターに用いる LYSO 結晶の品質管理

川上実言：(指導教員 東城順治)
新型モノリシックピクセル検出器の性能評価

永江航志：(指導教員 川越清以)
国際リニアコライダーにおけるフェルミ粒子対生成の精密測定による新物理探索の研究

西原雅志：(指導教員 東城順治)
COMET 実験 Phase-I トリガー検出器に用いるプラスチックシンチレータの性能評価

樋口義清：(指導教員 東城順治)
ATLAS 実験用新型ピクセル検出器の冷却部組立の開発と評価

山田瑞樹：(指導教員 東城順治)
ATLAS 実験用新型ピクセル検出器の試験量産における評価

博士論文

竹内佑甫：(指導教員 東城順治)
Development of an RF Cavity for Muon Linac Middle- β Section for Muon g-2/EDM Experiment at J-PARC

外国人留学生の受け入れ

Gui Lai (Imperial College London)

学外での学会活動

受託研究・民間との共同研究

その他の活動と成果

実験核物理

研究室構成員

若狭智嗣 教授 坂口聡志 教授
寺西高 准教授 市川雄一 准教授
西畑洗希 助教 庭瀬暁隆 助教
岩村龍典 技術職員

《 博士研究員 》

森田浩介（学術研究員・高等研究院教授）

《 大学院 修士課程 》

荒殿和希 井元悠介 梶原孝文 竹中京平
立川柊平 田中久登 能見幹都 松浦開
田中祐典 谷本昂平 長尾陽平 平沢健斗
松永琳太郎 道本優也 山ノ内邑希 山本陽介

《 学部 卒業研究生 》

牛島健成 北川尚幸 坂本健輔 清水博光
永武瞭 藤井友喜 藤本真広 松井瑠生
宮下直人

担当授業

力学基礎（若狭智嗣）、力学・同演習（若狭智嗣）、電磁気学基礎（坂口聡志、市川雄一）、熱力学基礎（坂口聡志、市川雄一）、原子核物理学（若狭智嗣）、物理実験学（寺西高）、原子核・高エネルギー実験学（寺西高）、物理学特別講義I（最先端物理学）（坂口聡志、寺西高、西畑洗希）、物理学の進展 A（坂口聡志）、身の回りの物理学 B（坂口聡志、市川雄一）、基礎物理実験学・同実験 A（市川雄一、庭瀬暁隆）、基礎物理実験学・同実験 B（市川雄一、庭瀬暁隆）、物理学総合実験（寺西高、坂口聡志、西畑洗希、庭瀬暁隆）、実験核物理学（寺西高、市川雄一）、物理学ゼミナール（西畑洗希、庭瀬暁隆）

研究・教育目標と成果

$d\text{-}\bar{p}$ 弾性散乱の偏極相関測定のためのトリガー系開発及び陽子標的の偏極度較正 (荒殿和希、西畑洗希、若狭智嗣)

核力がはたらく核子多体系である原子核の定量的理解には、三体核力の理解・高精度化が鍵であり、世界中で精力的に研究されている。高精度化の方策として、カイラル有効場理論に基づき三体核力を含め核力を統一的に記述し、そのパラメータを実験データから決定することが有効である。我々は、三体系である $d\text{-}p$ 弾性散乱の偏極相関係数からの決定を目指している。

本年度は、相関係数測定に用いるトリガー系の開発と陽子標的の偏極度較正を $p\text{-}\bar{p}$ 弾性散乱を測定することにより行った。トリガー系に対しては、プログラム可能な Complex Programmable Logic Device を用いることによりその簡略化を実現した。これにより、偏極陽子標的の左右に設置されたプラスチックシンチレータ検出器で、散乱陽子と反跳陽子の損失エネルギーが相関する $p\text{-}p$ 弾性散乱イベントを正しく収集・選択することができた。また、シンチレータ上流に設置された Multi-Wire Drift Chamber を用いて散乱陽子の飛跡の再構成を行い、散乱位置に対応する散乱陽子の飛跡の交点を求めた。これにより、偏極標的以外のカプトン膜などの寄与を取り除くことに成功した。

$p\text{-}p$ 弾性散乱イベントの左右の非対称度から偏極度を求めた。系統誤差抑制のため、同時に測定した NMR 信号により上下方向の偏極度の比を固定して導出すると、上方向が $24 \pm 12\%$ 、下方向が $-22 \pm 12\%$ と概ね想定の値が得られた。

九大 FFA 加速器からの新ビームラインおよび粒子識別可能な中性子測定系の開発 (竹中京平、西畑洗希、若狭智嗣)

九州大学 CABAS では、タンデム加速器と固定磁場強集束 (FFA) 加速器を組み合わせた複合加速器施設の整備が進められている。FFA 加速器からの 100 MeV 級の陽子や (p, n) 反応からの中性子照射による半導体の放射線耐性の測定等の計画がある。本研究では、FFA 加速器からのビームラインと、中性子・ガンマ線弁別方法である CF-ToT 法の開発を行った。

新ビームラインの開発はまず、遠隔制御可能な真空排気系を整備し、既存のビームラインに接続・テストした。その結果、到達真空度 4.2×10^{-6} Torr により、ビーム輸送に十分な真空度が得られた。次に、陽子ビームと中性子を分離するクリアリング電磁石の磁場シミュレーション、および陽子の軌道計算を行った。散乱槽にて水平・垂直方向共に全幅が 25 mm、角度拡がり $\sigma = 1.1^\circ$ の陽子ビームは偏向後、直径 110 mm のビームダンプ入口にほぼ 100% 輸送されることを確認した。

CF-ToT 法は、中性子とガンマ線をパルス波高に依存して定まる閾値を超える時間情報から弁別する方法である。我々は従来の FADC を用いない CF-ToT 法の回路を LTSpice で検討した。結果、中性子とガンマ線のパルスに対して、波高にほぼ依存せず

約 $0.5 \mu\text{s}$ の時間情報の差が存在することが確認され、CF-ToT 法を用いた高速・高分解能なデータ取得が可能であることが示された。

陽子偏極度計 2nd-FPP の 2 回散乱角度の確度および有効偏極分析能の精度向上 (梶原孝文、西畑洗希、若狭智嗣)

我々の研究グループは、原子核内での陽子・陽子 (p - p) 散乱に対応する ($p, 2p$) 反応を使用し、入射陽子と散乱陽子のスピン偏極を結び付ける偏極移行量を測定し、原子核中での相互作用 (核力) における媒質効果を実験的に観測することを目指している。開発している 2nd-FPP (Focal Plane Polarimeter) は、100 MeV 以下の後方散乱陽子の偏極度を導出する検出器であり、偏極分析標的としてプラシン内の炭素との弾性散乱を用いる。プラシンとの散乱では p -C 弾性散乱の他に p - p 弾性散乱や p -C 非弾性散乱が起きる。先行研究において、2 回散乱角度が 60° より大きな角度では文献値と良い一致を示すが、小さな角度では有意に小さいことが指摘された。その原因として、 p - p 弾性散乱が分離できずに漏れ込むことが示唆された。

そこで本研究では、プラシンより上流の MWDC で 1 個の入射陽子が検出され、下流の MWDC では 2 個の陽子が検出される p - p 弾性散乱イベントに対して、相対角度の水平成分を導出した。その結果、 p - p 弾性散乱のイベント数は p -C 弾性散乱に比べて優位に少なく、有効偏極分析能に与える影響は小さいことが確かめられた。次に、運動学的に 90° 未満であるはずの相対角度の水平成分が 110° まで分布していることが分かったため、有効偏極分析能の過小評価の原因は、 p - p 散乱の漏れ込みではなく、2 回散乱角度の過大評価と考え、検出器の位置を校正した。その結果、プラシンが約 3 mm 上流にずれていたことが分かり、較正された位置情報を用いて有効偏極分析能を導出したところ、2 回散乱角度 55° 以下の領域で 2 倍以上値が向上した。

スピン偏極した Mg のベータ崩壊を用いた中性子過剰 Al の励起状態の研究 (山本陽介、西畑洗希、市川雄一)

中性子数 20 付近の中性子過剰原子核は、その基底状態で球形が予測されるにも関わらず軸対称に変形していることが実験的に示唆されてきたなど、特異な構造が実験的に示唆され注目を集めている。本研究では、スピン偏極した原子核のベータ崩壊によりその娘核の励起状態のスピン・パリティを決定する独自の手法を用いて、その原子核領域に属する中性子過剰な Al 原子核の系統的な構造解明を目指している。

i) 2019 年 11 月に実施した ^{31}Al に関する実験の結果を投稿論文としてまとめ投稿した。現在投稿に向けて査読者とやりとりを行なっている。ii) 本年度はスピン偏極 ^{33}Mg ビームを用いた ^{33}Al の構造研究を進めた。9 月にカナダの TRIUMF 研究所に 2 週間程度滞在し実験準備を進め、12 月にビームタイムを実施した。ビームタイム中の簡易的

な解析において、 ^{33}Al のいくつかの励起状態についてスピン・パリティを決定することができた。現在 ^{33}Al の詳細な準位構造の構築に向けて解析を行なっている。

スピン配向 RI ビームを用いた核モーメント測定によるエキゾチック核構造の研究（市川雄一）

安定線から遠く離れた不安定核では多くのエキゾチックな構造が報告されている。エキゾチックな核構造を発現させる原動力になっていると考えられるのが、核における殻進化および変形の競合である。これらの競合を微視的視点から明らかにする上で有用な観測量が核モーメントである。新たに開発したスピン配向 RI ビーム生成技術を駆使して、エキゾチック核の核モーメント測定を行う計画を進めている。

2022年度に、理化学研究所において、 ^{99}Zr の核モーメント測定実験を行った。この実験では、分散整合二回散乱法を用いることで、およそ10%のスピン整列度を持つ ^{99}Zr のアイソマー状態を生成した。2023年度は、この実験データ解析を進めるとともに、2024年度に計画されている ^{130}Sn の励起状態核モーメント測定のための準備を行った。

核スピン歳差周波数精密測定による基本対称性の研究（立川柊平、谷本昂平、牛島健成、市川雄一）

現在の物質優勢な宇宙の姿は、宇宙初期における CP 対称性の破れを伴った物質創成に由来すると考えられている。そして、素粒子の標準理論を超えた CP 対称性の破れを反映する観測量として電気双極子モーメント（EDM）が注目を集めている。本研究では、 ^{129}Xe 原子とその異核種同位体である ^{131}Xe 原子の双方を EDM の測定対象かつ共存磁力計として用いる核スピンメーザーを開発し、これら Xe 原子の歳差周波数を精密に測定することで EDM の検出を目指している。

2021年度に九州大学にて核スピンメーザーの装置を構築した。2023年度は、ポンピングレーザーおよびプローブレーザーの新規導入を行い、その特性を評価した。周波数決定精度としては、20,000秒の測定において ^{129}Xe に対して45 nHz、 ^{131}Xe に対して19 nHzを得て、従来よりも短時間で同程度の決定精度を達成した。今後、ポンピングおよびプローブレーザーの波長および強度の安定化など、さらなる核スピンメーザーの安定化に向けた開発を進めていく予定である。

新元素の合成研究（坂口聡志、庭瀬暁隆、能見幹都、松浦開、道本優也、山ノ内邑希、北川尚幸、藤井友喜、宮下直人、森田浩介）

理研仁科センター、米国オークリッジ国立研究所及び国内外の諸機関と協力し、113番元素ニホニウムを超える、初の第8周期元素となる119番新元素の合成研究を進めている。超伝導線形加速器 SRILAC と新型の反跳分離装置 GARIS-III を組み合わせた最

新の実験施設が稼働を開始し、高い効率をもって $^{51}\text{V}+^{248}\text{Cm}$ 融合反応による実験を遂行している。九大グループは特に以下の項目で述べる通り後方準弾性散乱測定による融合障壁分布の測定と最適なビームエネルギーの推定を主導した。また、教員・大学院生による実験参加や検出器準備、九大における実験データの解析、九大加速器ビーム応用科学センターにおける MCP 型飛行時間検出器の開発などを通じて貢献を果たしている。

後方準弾性散乱測定による融合障壁分布の研究（坂口聡志、道本優也、山ノ内邑希、田中聖臣、庭瀬暁隆）

超重核の融合反応は二つの原子核同士が接触し一つの複合核を形成することによって起こる。超重核の生成断面積は入射エネルギーに極めて敏感であり、エネルギーが3% ずれただけでも断面積は一桁低下する。九州大学は2013年より、後方準弾性散乱測定により導出した融合障壁分布に基づき最適な入射エネルギーを推定するための手法を開発してきた。

まず近年の第一の研究では、理化学研究所 SRILAC において、119番元素探索のために実際に使用される反応系である $^{51}\text{V}+^{248}\text{Cm}$ 系について、後方角度 180° の準弾性散乱断面積をエネルギーの関数として測定した。得られた反射率の微分から障壁分布を導出し、最適な反応エネルギーを推定した。本研究で得られた値を用いて119番元素合成実験を遂行中である。結果は田中・坂口の両名を責任著者として Jour. Phys. Soc. Jpn 誌において発表し、同誌の “Most Cited Articles in 2023” に選出された（2024年3月）。

また、上記の手法の有効性の検証のため、実際に最適な反応エネルギーを決定することのできる反応系に関して同様の測定を行った。融合蒸発反応の断面積が現実的に測定可能なほど大きく、また実際に用いられている $^{51}\text{V}+^{248}\text{Cm}$ 反応と似た（標的核が同様の変形度を持つ） $^{51}\text{V}+^{159}\text{Tb}$ 反応系に関して、融合蒸発反応および準弾性散乱の両方を理化学研究所 SRILAC 施設において測定した。現在データを解析している。

低エネルギー重イオン検出用 MWPC の開発（能見幹都、坂口聡志、庭瀬暁隆）

一般的に寿命が極めて短く不安定である超重元素核の中で、陽子数114~120付近、中性子数184付近の中性子過剰な領域に位置する超重元素核は、長い寿命をもって安定に存在すると予言されており、この領域は「安定の島」と呼ばれている。我々はこの「安定の島」領域の原子核をどのように合成するかを探るために、低エネルギー中性子過剰核二次ビームを用いた融合分裂過程の研究を計画している。核分裂片の検出には多芯線比例計数管 (MWPC) が有用である。MWPC は真空中に設置され、低圧の気体を充填して使用される。本年度は、気体充填のためのガスハンドリングシステムを組

み上げ、リーク試験、およびテストチェンバーを用いたガス供給試験を行い、性能を実証した。

超重・アクチノイド核の質量測定研究（庭瀬暁隆、山ノ内邑希）

原子核は中性子や陽子といった核子の集合体が、結合エネルギー分だけ軽くなった状態で安定した系と考えることができる。結合エネルギーは核の存在や安定性を決定する指標となり、核子間相互作用を議論するための最も基本的かつ重要な物理量である。これまでに、高エネルギー加速器研究機構および理化学研究所との共同研究で、超重元素領域やアクチノイド領域の精密質量測定実験を実施し、原子核の核構造に関する多くの知見を得てきた。本年度は理化学研究所の加速器施設において105番元素ドブニウム同位体の質量測定実験を複数回実施し、 $^{257,258}\text{Db}$ を数イベント観測。これまでに得られていた質量値を向上させることに成功した。来年度も引き続き実験が予定されており、ドブニウム同位体の殻構造、とりわけ $N = 152$ の変形閉殻構造の解明に向けた実験に取り組んでいく。

アクチノイド核の β 遅延核分裂研究（庭瀬暁隆、藤井友喜）

金やウランといった重元素の起源は「物理学における11の未解決問題」の1つである。1950年代に予言された爆発的天体環境における速い中性子捕獲過程 (r 過程) は重元素を生成する唯一のシナリオと考えられ、その研究が盛んに行われてきた。2017年8月の重力波検出によって観測された中性子星合体の光度曲線から希土類までの重元素生成が定量的に説明出来たことから、この天体が r 過程の起源として有力視されている。次なる関心は核分裂を伴うさらに重い元素生成の証拠、 r 過程終焉部の核分裂同位体に関連する光度曲線の定量的予測であるが、理論計算に必要な入力パラメーターである中性子過剰核の崩壊様式に関する実験データが大幅に欠如しているために、その理論予測は精度不明な予測の域を脱していない。本研究では新たな核分裂障壁測定方法を開発し終焉部の崩壊様式を明らかにすることを最終目的とする。GAGGシンチレータとSi/太陽電池検出器アレイからなる遅発核分裂測定器を新規に開発し、 β 崩壊の最大エネルギーから核分裂障壁を、核分裂片計測からの質量分布測定をそれぞれ実施する。更にはこれらの同時計測から遅発核分裂の頻度を β 線のエネルギーの関数として決定する。本年度は研究の第一段階として、九大タンデム加速器による $^{56}\text{Fe}(p,p'\gamma)$ 反応によって生成される847 keVの γ 線を用いた、検出器のテスト環境を構築した。来年度はそれぞれの検出器の性能評価へ取り組んでいく予定である。

ホイル状態対崩壊実験に向けた検出器系の試験： $\alpha(^{16}\text{O},\alpha_1)$ および $\alpha(^{12}\text{C},\alpha_2)$ 反応の測定（井元悠介、寺西高）

重要な天体核反応の1つであるトリプルアルファ反応の反応率の決定には、原子核実験によるパラメータとして ^{12}C 第2励起状態の基底状態への崩壊幅 Γ_{rad} が必要である。この Γ_{rad} は放射崩壊分岐比 Γ_{rad}/Γ 、対崩壊分岐比 Γ_{π}/Γ の逆数、対崩壊幅 Γ_{π} の3つの実験値の積として決定されている。本研究では、このうち Γ_{π}/Γ を精密に決定するための $\alpha(^{12}\text{C},\alpha_2)$ 非弾性散乱を用いた実験手法の開発を進めた。最初に、 $\alpha(^{16}\text{O},\alpha_1)$ 反応を用いて、対崩壊分岐比が100%であり短時間で測定可能な ^{16}O 第一励起状態の対崩壊を測定対象にして検出器系の試験を実施し、バックグラウンドが最も少なくなる最適なビームエネルギーを決定した。次に、 $\alpha(^{12}\text{C},\alpha_2)$ 反応のテスト測定を、想定している本測定と比べて1/10のビーム強度および1/14の測定時間で実施し、対崩壊エネルギースペクトル上でのバックグラウンドの評価を行った。この結果をもとに、今後、いくつかのバックグラウンド低減策を実施した上で、再試験を行う予定である。

r 過程における中性子捕獲反応断面積決定のための $d(^{124}\text{Sn},p)$ 反応の測定 (田中久登、寺西高)

r 過程による生成元素存在比の第二ピークの起源は r 過程経路上の質量数 $A = 130$ 付近の原子核であると考えられている。その中でも ^{130}Sn の (n, γ) 反応率は、最終的な元素存在比を大きく変化させることが報告されている。しかし、 ^{130}Sn 及び中性子は共に不安定核であるため、 $^{130}\text{Sn}(n, \gamma)$ 反応断面積を直接測定することは困難である。そこで我々は、代理反応として、 $^{130}\text{Sn}(d,p)$ 核子移行反応の測定を ^{130}Sn 二次ビームを用いて行い、代理反応法により (n, γ) 反応断面積を導出する研究を進めている。この方法では、 ^{130}Sn 近傍の安定核 ^{124}Sn または ^{130}Te の既知の (n, γ) 反応断面積を基準値として使用するため、生成複合核 ^{125}Sn 及び ^{131}Te の非束縛領域からの γ 放出確率が必要となる。これらの γ 放出確率を決定するための実験として、 ^{124}Sn 及び ^{130}Te に関しても二次ビームを用いた代理反応の測定を同様に行った。本研究では、三つの代理反応のうち $d(^{124}\text{Sn},p)$ 反応の解析を行い、特に、一連の解析の中で、残留核 ^{125}Sn の励起エネルギースペクトルに着目した。

実験は理化学研究所のRIBFにおいて行われた。エネルギー減衰ビームラインOEDOにより分離された核子あたり21 MeVの ^{124}Sn 二次ビームを厚さ 1.2 mg/cm^2 の $(\text{CD}_2)_n$ 重陽子標的に照射した。 (d,p) 反応による反跳陽子のエネルギーと角度は標的の近傍に設置した反跳粒子検出器系TiNAにより決定された。前方角度に放出される ^{125}Sn 複合核起源の ^{124}Sn または ^{125}Sn イオンはSHARAQ磁気分析器及び焦点面検出器により検出、識別された。質量欠損法により、残留核 ^{125}Sn の励起エネルギースペクトルが得られた。このエネルギースペクトルから導かれる、複合核 ^{125}Sn の非束縛領域における状態密度分布は、励起エネルギーとともに単調増加するという一般によく知られた形であることが確認できた。また、本結果を平行して解析が進められている ^{131}Sn と ^{131}Te

の状態密度分布の暫定解析結果と比較し議論した。

発表論文

《原著論文》

Neutron-skin values and matter and neutron radii determined from reaction cross sections of proton scattering on ^{12}C , $^{40,48}\text{Ca}$, ^{58}Ni , and ^{208}Pb :

T. Wakasa, S. Tagami *et al.*

Phys. Rev. C **107**, 024608 (2023).

Experimental study of $(p, 2p)$ reactions at 197 MeV on ^{12}C , ^{16}O , $^{40,48}\text{Ca}$, and ^{90}Zr nuclei leading to low-lying states of residual nuclei:

T. Noro, S. Sakaguchi, T. Wakasa, *et al.*

Prog. Theor. Exp. Phys. **2023**, 093D01 (2023).

Determination of matter radius and neutron-skin thickness of $^{60,62,64}\text{Ni}$ from reaction cross section of proton scattering on $^{60,62,64}\text{Ni}$ targets:

S. Tagami, T. Wakasa, *et al.*

Results in Physics **51**, 106748 (2023).

$^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ scattering as the reference system for reaction cross section:

S. Tagami, T. Wakasa, *et al.*

Results in Physics **51**, 106675 (2023).

Skin values and matter radii of ^{208}Pb and $^{58,60,64}\text{Ni}$ based on reaction cross section of $^{3,4}\text{He}$:

S. Tagami, T. Wakasa, *et al.*

Results in Physics **51**, 106649 (2023).

Neutron skin thickness of $^{116,118,120,122,124}\text{Sn}$ determined from reaction cross sections of proton scattering:

S. Tagami, T. Wakasa, *et al.*

Results in Physics **46**, 106296 (2023).

Searching for universality of dineutron correlation at the surface of Borromean nuclei:
A. Corsi, Y. Kubota, J. Casal, M. Gómez-Ramos, A. M. Moro, G. Authelet, H. Baba, C. Caesar, D. Calvet, A. Delbart, M. Dozono, J. Feng, F. Flavigny, J. -M. Gheller, J. Gibelin, A. Giganon, A. Gillibert, K. Hasegawa, T. Isobe, Y. Kanaya, S. Kawakami, D. Kim, Y. Kiyokawa, M. Kobayashi, N. Kobayashi, T. Kobayashi, Y. Kondo, Z. Korukulu, S. Koyama, V. Lapoua, Y. Maeda, F. M. Marqués, T. Motobayashi, T. Miyazaki, T. Nakamura, N. Nakatsuka, Y. Nishio, A. Obertelli, A. Ohkura, N. A. Orr, S. Ota, H. Otsu, T. Ozaki, V. Panin, S. Paschalis, E. C. Pollacco, S. Reichert, J. -Y. Rousse, A. T. Saito, S. Sakaguchi, M. Sako, C. Santamaria, M. Sasano, H. Sato, M. Shikata, Y. Shimizu, Y. Shindo, L. Stuhl, T. Sumikama, Y. L. Sun, M. Tabata, Y. Togano, J. Tsubota, T. Uesaka, Z. H. Yang, J. Yasuda, K. Yoneda, J. Zenihiro
Phys. Lett. B **840**, 137875 (2023).

Multiple mechanisms in proton-induced nucleon removal at ~ 100 MeV/nucleon:
T. Pohl, Y. L. Sun, A. Obertelli, J. Lee, M. Gómez-Ramos, K. Ogata, K. Yoshida, B. S. Cai, C. X. Yuan, B. A. Brown, H. Baba, D. Beaumel, A. Corsi, J. Gao, J. Gibelin, A. Gillibert, K. I. Hahn, T. Isobe, D. Kim, Y. Kondo, T. Kobayashi, Y. Kubota, P. Li, P. Liang, H. N. Liu, J. Liu, T. Lokotko, F. M. Marqués, Y. Matsuda, T. Motobayashi, T. Nakamura, N. A. Orr, H. Otsu, V. Panin, S. Y. Park, S. Sakaguchi, M. Sasano, H. Sato, H. Sakurai, Y. Shimizu, A. I. Stefanescu, L. Stuhl, D. Suzuki, Y. Togano, D. Tudor, T. Uesaka, H. Wang, X. Xu, Z. H. Yang, K. Yoneda, and J. Zenihiro
Phys. Rev. Lett. **130**, 172501 (2023).

Observation of the Exotic 0_2^+ Cluster State in ^8He :
Z. H. Yang, Y. L. Ye, B. Zhou, H. Baba, R. J. Chen, Y. C. Ge, B. S. Hu, H. Hua, D. X. Jiang, M. Kimura, C. Li, K. A. Li, J. G. Li, Q. T. Li, X. Q. Li, Z. H. Li, J. L. Lou, M. Nishimura, H. Otsu, D. Y. Pang, W. L. Pu, R. Qiao, S. Sakaguchi, H. Sakurai, Y. Satou, Y. Togano, K. Tshoo, H. Wang, S. Wang, K. Wei, J. Xiao, F. R. Xu, X. F. Yang, K. Yoneda, H. B. You, and T. Zheng
Phys. Rev. Lett. **131**, 242501 (2023).

First direct mass measurement for neutron-rich ^{112}Mo with the new ZD-MRTOF mass spectrograph system:
D. S. Hou, A. Takamine, M. Rosenbusch, W. D. Xian, S. Iimura, S. D. Chen, M. Wada,

H. Ishiyama, P. Schury, Z. M. Niu, H. Z. Liang, S. X. Yan, P. Doornenbal, Y. Hirayama, Y. Ito, S. Kimura, T. M. Kojima, W. Korten, J. Lee, J. J. Liu, Z. Liu, S. Michimasa, H. Miyatake, J. Y. Moon, S. Naimi, S. Nishimura, T. Niwase, T. Sonoda, D. Suzuki, Y. X. Watanabe, K. Wimmer, H. Wollnik
Phys. Rev. C **108**, 054312 (2023).

Studying the impact of deuteron non-elastic breakup on $^{93}\text{Zr} + \text{d}$ reaction cross sections measured at 28 MeV/nucleon:

T. Chillery, J. W. Hwang, M. Dozono, N. Imai, S. Michimasa, T. Sumikama, N. Chiga, S. Ota, S. Nakayama, D. S. Ahn, O. Beliuskina, K. Chikaato, N. Fukuda, S. Hayakawa, E. Ideguchi, K. Iribe, C. Iwamoto, S. Kawase, K. Kawata, N. Kitamura, K. Kusaka, S. Masuoka, H. Miki, H. Miyatake, D. Nagae, R. Nakajima, K. Nakano, M. Ohtake, S. Omika, H. J. Ong, H. Otsu, H. Sakurai, P. Schrock, H. Shimizu, Y. Shimizu, X. H. Sun, D. Suzuki, H. Suzuki, M. Takaki, M. Takechi, H. Takeda, S. Takeuchi, T. Teranishi, R. Tsunoda, H. Wang, Y. Watanabe, Y. X. Watanabe, K. Wimmer, K. Yako, H. Yamada, K. Yamada, H. Yamaguchi, L. Yang, R. Yanagihara, Y. Yanagisawa, H. Yoshida, K. Yoshida, S. Shimoura
Prog. Theo. Exp. Phys. **2023**, 121D01 (2023).

Production of new neutron-rich isotopes near the $N = 60$ isotones ^{92}Ge and ^{93}As by in-flight fission of a 345 MeV/nucleon ^{238}U beam

Y. Shimizu, T. Kubo, T. Sumikama, N. Fukuda, H. Takeda, H. Suzuki, D. S. Ahn, N. Inabe, K. Kusaka, M. Ohtake, Y. Yanagisawa, K. Yoshida, Y. Ichikawa, T. Isobe, H. Otsu, H. Sato, T. Sonoda, D. Murai, N. Iwasa, N. Imai, Y. Hirayama, S. C. Jeong, S. Kimura, H. Miyatake, M. Mukai, D. G. Kim, E. Kim, and A. Yagi
Phys. Rev. C **109**, 044313 (2024)

Demonstration of nuclear gamma-ray polarimetry based on a multi-layer CdTe Compton camera

S. Go, Y. Tsuzuki, H. Yoneda, Y. Ichikawa, T. Ikeda, N. Imai, K. Imamura, M. Niikura, D. Nishimura, R. Mizuno, S. Takeda, H. Ueno, S. Watanabe, T. Y. Saito, S. Shimoura, S. Sugawara, A. Takamine, T. Takahashi
Sci. Rep. **14**, 2573 (2024).

Nuclear-moment measurement using highly spin-aligned RI beams: Recent activities

at RIBF

Y. Ichikawa, Y. Shinohara, S. Go, H. Nishibata, S. Ando, K. Asahi, H. Baba, N. Fukuda, G. Georgiev, A. Gradkov, K. Imamura, K. Kishimoto, R. Lozeva, M. Mukai, M. Niikura, Nurhafiza M. Nor, A. Odahara, Y. Shimizu, M. Si, K. Stoychev, H. Suzuki, M. Tajima, A. Takamine, H. Takeda, S. Takeshige, M. Tanaka, Y. Togano, H. Ueno, T. Wakasa, W. Yamashita, H. Yamazaki, M. Yoshimoto, J. M. Daugas
Interactions **245**, 26 (2024).

Precise Spectroscopy of the 3n and 3p Systems via the ${}^3\text{H}(t,{}^3\text{He})3\text{n}$ and ${}^3\text{He}({}^3\text{He},t)3\text{p}$ Reactions at Intermediate Energies

K. Miki, K. Kameya, D. Sakai, R. Urayama, N. Imai, S. Ishikawa, S. Michimasa, S. Ota, M. Sasano, H. Takeda, T. Uesaka, H. Haba, M. Hara, Y. Hatano, T. Hayamizu, N. Kobayashi, A. Tamii, S. Adachi, T. Chillery, M. Dozono, Y. Fujikawa, H. Fujita, N. Fukuda, T. Furuno, J. Gao, S. Goto, S. Hanai, S. Hayakawa, Y. Hijikata, K. Himi, Y. Hirai, J. W. Hwang, M. Ichimura, D. Inomoto, M. Inoue, H. Kasahara, T. Kawabata, K. Kishimoto, S. Kitayama, K. Kusaka, J. Li, Y. Maeda, Y. Maruta, T. Matsui, T. Matsuzaki, S. Nakai, H. Nishibata, M. Otake, Y. Saito, H. Sakai, A. Sakaue, H. Sato, K. Sekiguchi, Y. Shimizu, S. Shimoura, L. Stuhl, T. Sumikama, H. Suzuki, R. Tsuji, S. Tsuji, H. Umetsu, Y. Utsuki, T. Wakasa, A. Watanabe, K. Yako, Y. Yanagisawa, N. Yokota, C. Yonemura, K. Yoshida, M. Yoshimoto, for the RCNP-E502 Collaboration, for the RIBF-SHARAQ11 Collaboration
Phys. Rev. Lett. **133**, 012501 (2024).

Excited-State Half-Lives in ${}^{130}\text{Cd}$ and the Isospin Dependence of Effective Charges

A. Jungclaus, M. Gorska, M. Mikolajczuk, J. Acosta, J. Taprogge, S. Nishimura, P. Doornenbal, G. Lorusso, G. S. Simpson, P. -A. Soderstrom, T. Sumikama, Z. Xu, P. Kumar, G. Martinez-Pinedo, F. Nowacki, P. Van Isacker, H. Baba, F. Browne, N. Fukuda, R. Gernhauser, G. Gey, N. Inabe, T. Isobe, H. S. Jung, D. Kameda, G. D. Kim, Y. -K. Kim, I. Kojouharov, T. Kubo, N. Kurz, Y. K. Kwon, Z. Li, H. Sakurai, H. Schaffner, Y. Shimizu, K. Steiger, H. Suzuki, H. Takeda, Zs. Vajta, H. Watanabe, J. Wu, A. Yagi, K. Yoshinaga, G. Benzoni, S. Bonig, K. Y. Chae, J. -M. Daugas, F. Drouet, A. Gadea, S. Ilieva, F. G. Kondev, T. Kroll, G. J. Lane, A. Montaner-Piza, K. Moschner, F. Naqvi, M. Niikura, H. Nishibata, A. Odahara, R. Orlandi, Z. Patel, Zs. Podolyak, A. Wendt
Phys. Rev. C **132**, 222501 (2024).

Mass, Spectroscopy, and Two-Neutron Decay of ^{16}Be :

B. Monteagudo, F. M. Marqués, J. Gibelin, N. A. Orr, A. Corsi, Y. Kubota, J. Casal, J. Gómez-Camacho, G. Authelet, H. Baba, C. Caesar, D. Calvet, A. Delbart, M. Dozono, J. Feng, F. Flavigny, J.-M. Gheller, A. Giganon, A. Gillibert, K. Hasegawa, T. Isobe, Y. Kanaya, S. Kawakami, D. Kim, Y. Kiyokawa, M. Kobayashi, N. Kobayashi, T. Kobayashi, Y. Kondo, Z. Korkulu, S. Koyama, V. Lapoux, Y. Maeda, T. Motoyoshi, T. Miyazaki, T. Nakamura, N. Nakatsuka, Y. Nishio, A. Obertelli, A. Ohkura, S. Ota, H. Otsu, T. Ozaki, V. Panin, S. Paschalis, E. C. Pollacco, S. Reichert, J.-Y. Rousse, A. T. Saito, S. Sakaguchi, M. Sako, C. Santamaria, M. Sasano, H. Sato, M. Shikata, Y. Shimizu, Y. Shindo, L. Stuhl, T. Sumikama, Y. L. Sun, M. Tabata, Y. Togano, J. Tsubota, T. Uesaka, Z. H. Yang, J. Yasuda, K. Yoneda, and J. Zenihiro
Phys. Rev. Lett. **132**, 082501 (2024).

Increasing the rate capability for the cryogenic stopping cell of the FRS Ion Catcher:

J. W. Zhao, D. Amanbayev, T. Dickel, I. Miskun, W. R. Plass, N. Tortorelli, S. Ayet San Andres, S. Beck, J. Bergmann, Z. Brencic, P. Constantin, H. Geissel, F. Greiner, L. Grof, C. Hornung, N. Kuzminchuk, G. Kripko-Koncz, I. Mardor, I. Pohjalainen, C. Scheidenberger, P. G. Thirolf, S. Bagchi, E. Haettner, E. Kazantseva, D. Kostyleva, A. Oberstedt, S. Pietri, M. P. Reiter, Y. K. Tanaka, M. Wada, D. L. Balabanski, D. Benyamin, M. N. Harakeh, N. Hubbard, N. Kalantar-Nayestanaki, A. Mollaebrahimi, I. Mukha, M. Narang, T. Niwase, Z. Patyk, S. Purushothaman, A. Rotaru, A. Spataru, G. Stanic, M. Vencelj, H. Weick, J. Yu, the Super-FRS Experiment Collaboration
Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B **547** 165175 (2024).

Mass measurements of neutron-rich $A \sim 90$ nuclei constrain element abundances:

W. Xian, S. Chen, S. Nikas, M. Rosenbusch, M. Wada, H. Ishiyama, D. Hou, S. Iimura, S. Nishimura, P. Schury, A. Takamine, S. Yan, F. Browne, P. Doornenbal, F. Flavigny, Y. Hirayama, Y. Ito, S. Kimura, T. M. Kojima, J. Lee, J. Liu, H. Miyatake, S. Michimasa, J. Y. Moon, S. Naimi, T. Niwase, T. Sonoda, D. Suzuki, Y. X. Watanabe, V. Werner, K. Wimmer, H. Wollnik
Phys. Rev. C **109**, 035804 (2024).

Helium gas cell with RF wire carpets for KEK Isotope Separation System:

Y Hirayama, M. Mukai, P. Schury, Y. X. Watanabe, S. Iimura, H. Ishiyama, S. C. Jeong,

H. Miyatake, T. Niwase, M. Rosenbusch, A. Takamine, A. Taniguchi, M. Wada
Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A **1058**, 168838 (2024).

Neutron capture reaction cross-section of ^{79}Se through the $^{79}\text{Se}(\text{d},\text{p})$ reaction in inverse kinematics:

N. Imai, M. Dozono, S. Michimasa, T. Sumikama, S. Ota, S. Hayakawa, J. W. Hwang, K. Iribe, C. Iwamoto, S. Kawase, K. Kawata, N. Kitamura, S. Masuoka, K. Nakano, P. Schrock, D. Suzuki, R. Tsunoda, K. Wimmer, D. S. Ahn, O. Beliuskina, N. Chiga, N. Fukuda, E. Ideguchi, K. Kusaka, H. Miki, H. Miyatake, D. Nagae, S. Ohmika, M. Ohtake, H. J. Ong, H. Otsu, H. Sakurai, H. Shimizu, Y. Shimizu, X. Sun, H. Suzuki, M. Takaki, H. Takeda, S. Takeuchi, T. Teranishi, Y. Watanabe, Y. X. Watanabe, K. Yako, H. Yamada, H. Yamaguchi, L. Yang, R. Yanagihara, Y. Yanagisawa, K. Yoshida, S. Shimoura

Phys. Lett. B **850**, 138470 (2024).

Heavy Ion Injection of Fixed-Field Alternating Gradient Accelerator:

Y. Yonemura, H. Arima, H. Nishibata, T. Teranishi, T. Wakasa, N. Ikeda, K. Watanabe, N. Shigyo, T. Iwamura, K. Adachi, K. Takamatsu, M. Kotani, H. Tanaka, R. Matsunaga, T. Matsumoto, K. Takenaka, T. Kajihara, S. Matsunaga, Y. Shinohara, and Y. Mori

Prog. Theo. Exp. Phys. **2024**, 023G01 (2024).

《その他の論文》

著書

講演

《海外での講演》

Development of dual-species spin maser of ^{129}Xe and ^{131}Xe toward the EDM measurement (Poster):

K. Tanimoto *et al.*

A3F-CNS Summer School 2023, August 4-10 (2023), Wako, Japan.

Reconstruction of $^{33}\text{Mg} \rightarrow ^{33}\text{Al}$ decay scheme (Poster):

Y. Yamamoto *et al.*

A3F-CNS Summer School 2023, August 4-10 (2023), Wako, Japan.

Recent progress of superheavy element research:

T. Niwase

RIBF Users Meeting 2023, September 07, 2023, Wako, Japan (Invited).

Direct mass measurement of superheavy nuclides produced by fusion-evaporation reactions:

T. Niwase, P. Schury, M. Wada, P. Brionnet, S. D. Chen, T. Gao, T. Hashimoto, H. Haba, Y. Hirayama, D. Hou, S. Iimura, H. Ishiyama, S. Ishizawa, Y. Ito, D. Kaji, S. Kimura, H. Koura, J. Liu, H. Miyatake, J. Y. Moon, K. Morita, K. Morimoto, D. Nagaе, M. Rosenbusch, A. Takamine, Y. X. Watanabe, W. Xian, H. Wollnik, S. Yan, J. M. Yap

International conference on Heavy-Ion collision at near barrier energies, FUSION23

Nuclear-moment measurement using highly spin-aligned RI beams: Recent activities at RIBF:

Y. Ichikawa

International Conference on Hyperfine Interactions and their Applications (HYPERFINE2023), November 13-17 (2023), Nara, Japan.

Performance and geant4 simulation of the proton polarimeter 2nd-FPP for $(p, 2p)$ measurements:

Yusuke Tanaka

2023 Fall Meeting of APS DNP and JPS (Hawaii 2023).

Neutron and gamma-ray discrimination based on pulse shape information and study of (p, n) reactions for isobaric analog states:

Ryo Nagatake

2023 Fall Meeting of APS DNP and JPS (Hawaii 2023).

Study of spin-dipole transitions from ^{16}O via the (p, n) reaction and improvement of position resolution of two-dimensional neutron detector NPOL2:

Ryusei Matsui

2023 Fall Meeting of APS DNP and JPS (Hawaii 2023).

Proton-induced knockout ($p, 2N$) reactions on stable nuclei as a tool to determine spectroscopic factors:

Tomotsugu Wakasa

The African Nuclear Physics Conference 2023 (ANPC2023), 2023年12月, ハイブリッド形式で開催.

Determining the pair and radiative decay branching ratios of the Hoyle state: Test experiments at Kyushu University:

Takashi Teranishi

International Workshop “Nuclear Astrophysics with Stable Beams”, 20 Feb. 2024, Tokai, Ibaraki Japan.

Nuclear-moment measurements by gamma-ray spectroscopy:

Y. Ichikawa

The workshop on frontier nuclear studies with gamma-ray spectrometer arrays (gamma24), March 26-28 (2024), Osaka, Japan (Invited).

Recent activities at GARIS and future directions:

S. Sakaguchi

The workshop on frontier nuclear studies with gamma-ray spectrometer arrays (gamma24), March 26-28 (2024), Osaka, Japan (Invited).

Spin-polarized β - γ spectroscopy exploring shape coexistence in neutron-rich nuclei:

H. Nishibata and the TRIUMF PDS collaboration

The workshop on frontier nuclear studies with gamma-ray spectrometer arrays (gamma24), March 26-28 (2024), Osaka, Japan (Invited).

Level scheme of ^{33}Al by beta-decay spectroscopy of ^{33}Mg :

Y. Yamamoto, H. Nishibata, A. Odahara, T. Shimoda, R. Miyahara, N. Itakura, R. Yasuda, Nurhafiza M. Nor, A. Hatakeyama, Y. Hirayama, S. Iimura, Y. Ichikawa, J. Lassen, R. Li

The workshop on frontier nuclear studies with gamma-ray spectrometer arrays (gamma24), March 26-28 (2024), Osaka, Japan.

《国内での講演》

九大実験核重元素核グループの活動と核融合反応機構の研究：

坂口聡志

研究会「現代核物理の広がり」と展望」、2023年7月19–21、九州大学（招待講演）

Recent activities and future plan of superheavy element group at Kyushu University:

坂口聡志

第12回停止・低速RIビームを用いた核分光研究会 (12th SSRI)、2023年9月4–5日、立教大学（招待講演）

MRTOFを用いた質量測定と核反応研究：

庭瀬暁隆

第12回停止・低速RIビームを用いた核分光研究会 (12th SSRI)、2023年9月4–5日、立教大学（招待講演）

EDM探索に向けた ^{129}Xe 、 ^{131}Xe 核スピンメーザーの開発（ポスター発表）：

立川柊平、市川雄一、佐藤智哉、安藤蒼太、篠原悠介、谷本昂平、山本陽介、西畑洗希、郷慎太郎、高峰愛子、上野秀樹、旭耕一郎

第12回停止・低速RIビームを用いた核分光研究会 (12th SSRI)、2023年9月4–5日、立教大学

高精度質量分析器による蒸発残留核断面積の励起関数測定：

庭瀬暁隆、和田道治、Schury Peter、木村創大、Brionnet Pierre、Chaoyi Fu、羽場宏光、平山 賀一、石山博恒、伊藤由太、加治大哉、宮武宇也、森本幸司、Rosenbusch Marco、高峰愛子、渡邊裕

日本放射化学会第67回討論会、2023年09月21–23日、広島大学

太陽電池検出器のエネルギー・時間分解能および放射線耐性の評価：

能見幹都、坂口聡志、浅井雅人、甲斐民人、杉山晃一、鄭淳讚、富松太郎、長江大輔、永田優斗、庭瀬暁隆、松浦開、松永壮太郎、武藤大河、森田浩介

日本放射化学会第67回討論会、2023年9月21日–23日、広島大学

Xe原子EDM探索に向けた同位体共存磁力計の開発：

立川柊平、市川雄一、佐藤智哉、安藤蒼太、篠原悠介、谷本昂平、山本陽介、西畑洗希、郷慎太郎、高峰愛子、上野秀樹、旭耕一郎

第 129 回日本物理学会九州支部例会、2023 年 12 月 2 日、長崎大学

九州大学加速器・ビーム応用科学センターにおける新ビームライン開発：

竹中京平、若狭智嗣、西畑洗希、岩村龍典、荒殿和希、梶原孝文、立川柊平、長尾陽平、田中裕典、谷本晃平、山本陽介

第 129 回日本物理学会九州支部例会、2023 年 12 月 2 日、長崎大学

重陽子-陽子弾性散乱の偏極相関係数測定に向けた偏極陽子標的の偏極度測定：

荒殿和希、若狭智嗣、西畑洗希、梶原孝文、平沢健斗、関口仁子、渡邊跡武、齋藤由子、丸田祥輝、松井貴哉、鈴木小太郎、立石健一郎、三浦大輔、吉田英智

第 129 回日本物理学会九州支部例会、2023 年 12 月 2 日、長崎大学

陽子偏極度計の偏極分析能向上のための MWDC を用いた 2 陽子同時測定：

梶原孝文、山下渉、若狭智嗣、西畑洗希、田中裕典、荒殿和希、谷本昂平、長尾陽平、山本陽介、岸本侃己、竹中京平、大田晋輔、小林信之、吉田英智

第 129 回日本物理学会九州支部例会、2023 年 12 月 2 日、長崎大学

核分裂片測定に向けた MWPC 検出器の開発：

能見幹都、坂口聡志、庭瀬暁隆、田中聖臣、松浦開、道本優也、山ノ内邑希、宮下直人、藤井友喜、北川尚幸

第 129 回日本物理学会九州支部例会、2023 年 12 月 2 日、長崎大学

新元素合成実験における解析手法の開発：

松浦開、坂口聡志、庭瀬暁隆 for nSHE collaboration

第 129 回日本物理学会九州支部例会、2023 年 12 月 2 日、長崎大学

ホイル状態対崩壊実験に向けた検出器系のテスト： $\alpha(^{16}\text{O}, \alpha_1)$ 反応の測定：

井元悠介、寺西高、田中久登、松永琳太郎、藤本真広

第 129 回日本物理学会九州支部例会、2023 年 12 月 2 日、長崎大学 (長崎市)

r 過程における中性子捕獲反応断面積決定のための $d(^{124}\text{Sn}, p)$ 反応の測定：

田中久登、寺西高、for SAKURA collaboration

第 129 回日本物理学会九州支部例会、2023 年 12 月 2 日、長崎大学 (長崎市)

核反応によるスピン整列生成と核内スピン構造の探索：

市川雄一

研究会「原子核におけるスピン自由度の織り成すダイナミクス」、2023年12月11-13日、大阪大学 RCNP（招待講演）

(超) 重元素実験でのアナログ回路のはなし：

庭瀬暁隆

SPADI Alliance, 2024年1月19日, online（招待講演）

融合反応における α 粒子放出過程：

坂口聡志

研究会「低エネルギー重イオン反応と超重元素の科学」、2024年3月3日、学士会館（招待講演）

Radiation tolerance of Solar Cell detector for low-energy nuclear physics:

坂口聡志

KEK 測定器開発プラットフォーム・シリコン検出器七回ミーティング、2024年3月5-6日、online（招待講演）

波形情報に基づいた中性子・ガンマ線弁別と (p, n) 反応によるアイソバリック・アナログ状態への遷移の研究：

永武瞭、若狭智嗣、西畑洗希、松井瑠生、清水博光、坂本健輔、牛島健成、大田晋輔、吉田英智

日本物理学会 2024年春季大会、2024年3月18日、オンライン

新元素合成のための最適反応エネルギー推定に向けた $^{51}\text{V}+^{159}$ 融合反応の障壁分布測定：

道本優也、坂口聡志、庭瀬暁隆、nSHE collaboration

日本物理学会 2024年春季大会、2024年3月18日、オンライン

新元素合成のための最適反応エネルギー推定に向けた $^{51}\text{V}+^{159}\text{Tb}$ 融合反応の励起関数測定：

山ノ内邑希、坂口聡志、庭瀬暁隆、nSHE collaboration

日本物理学会 2024年春季大会、2024年3月18日、オンライン

外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》

文部省科学研究費補助金、基盤研究（B）

FFA 加速器を用いた原子核の陽子・中性子半径の独立測定で迫る状態方程式と元素合成

研究代表者：若狭智嗣

科学研究費補助金、基盤研究（B）

ホイル状態崩壊分岐比の精密決定

研究代表者：寺西高

科学研究費補助金、基盤研究（B）

核分裂片同時計数検出器による中性子過剰核の融合反応機構研究

研究代表者：坂口聡志

科学研究費補助金、基盤研究（B）

スピン整列ビームを用いたエキゾチック核構造研究の展開

研究代表者：市川雄一

科学研究費補助金、挑戦的研究（萌芽）

Xe 原子 EDM 測定に向けた電極素材表面における ^{131}Xe スピン緩和機構の解明

研究代表者：市川雄一

科学研究費補助金、若手研究

新奇手法による中性子過剰核の構造研究：“逆転の島”境界原子核の完全理解に向けて

研究代表者：西畑洗希

科学研究費補助金、若手研究

箱型 Si 検出器搭載の飛行時間検出器の開発

研究代表者：庭瀬暁隆

文部省科学研究費補助金、基盤研究（S）

陽子・三核子系散乱による核子間三体力の完成

研究分担者：若狭智嗣（研究代表者 東京工業大学大学院理学研究科 関口仁子）

科学研究費補助金、基盤研究 (S)

三核子系散乱による核子間三体力の完成

研究分担者：坂口聡志 (研究代表者 東北大学大学院理学研究科 関口仁子)

文部省科学研究費補助金、新学術領域研究

エキゾチック核子多体系で紐解く物質の階層構造

研究分担者：若狭智嗣 (研究代表者 東京工業大学大学院理学研究科 中村隆司)

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

他大学での研究と教育

学部 4 年生卒業研究

牛島健成：(指導教員、市川雄一)：核スピンメーザーによるフィードバック磁場の最適化とメーザー発振測定

北川尚幸：(指導教員、田中聖臣・坂口聡志)：低速 RI ビーム融合反応のための大強度耐性イオンチェンバーの開発

坂本健輔：(指導教員、若狭智嗣・西畑洸希)： (p, n) 反応を用いた ^{16}O のスピン双極子遷移及び 2 次元中性子検出器の位置再構成の研究

清水博光：(指導教員、若狭智嗣・西畑洸希)：アイソバリック・アナログ状態の測定による原子核半径の計算と PSD 法を用いた中性子と γ 線の識別についての研究

永武 瞭：(指導教員、若狭智嗣・西畑洸希)：波形情報に基づいた中性子・ガンマ線弁別と (p, n) 反応によるアイソバリック・アナログ状態への遷移の研究

藤井友喜：(指導教員、庭瀬暁隆・坂口聡志)： γ 線核分光測定に向けた九大タンデムにおける $^{56}\text{Fe}(p, p'\gamma)$ 反応の測定

藤本真広：(指導教員、寺西高)： $\alpha(^7\text{Li},p)$ 及び $\alpha(^7\text{Li},\alpha)$ による ^{11}B の共鳴状態の探索:
実験条件の検討

松井瑠生：(指導教員、若狭智嗣・西畑洗希)： $^{16}\text{O}(p,n)$ 反応を用いたスピン双極子遷移に関する研究

宮下直人：(指導教員、坂口聡志・庭瀬暁隆)：イオン光学シミュレーションによる MCP-TOF 検出器の高度化の検討

修士論文

荒殿 和希：(指導教員、若狭智嗣・西畑洗希)： $\vec{d}\cdot\vec{p}$ 弾性散乱の偏極相関測定のためのトリガー系開発及び陽子標的の偏極度較正

井元悠介：(指導教員、寺西高)：ホイル状態対崩壊実験に向けた検出器系の試験： $\alpha(^{16}\text{O},\alpha_1)$ および $\alpha(^{12}\text{C},\alpha_2)$ 反応の測定

梶原孝文：(指導教員、若狭智嗣・西畑洗希)：陽子偏極度計 2nd-FPP の 2 回散乱角度の 確度および有効偏極分析能の精度向上

竹中京平：(指導教員、若狭智嗣・西畑洗希)：九大 FFA 加速器からの新ビームラインおよび粒子識別可能な中性子測定系の開発

立川柊平：(指導教員、市川雄一)：核スピンメーザーにおけるポンピング及びプローブレーザーの特性評価

田中久登：(指導教員、寺西高)：r 過程における ^{130}Sn 中性子捕獲断面積決定のための $d(^{124}\text{Sn},p)$ 反応の測定

能見幹都：(指導教員、坂口聡志・庭瀬暁隆)：核分裂片測定のための MWPC 検出器の開発と太陽電池検出器の性能評価

松浦開：(指導教員、坂口聡志・庭瀬暁隆)：新元素探索へ向けた蒸発残留核-アルファ

崩壊の相関解析手法の構築

博士論文

外国人留学生の受け入れ

学外での学会活動

- 若狭智嗣： 大阪大学核物理研究センター運営委員会委員
東京大学 原子核科学研究センター 運営委員会委員
日本物理学会・実験核物理領域・領域代表
- 坂口聡志： nSHE Research Group Management Board Member
大阪大学核物理研究センター研究計画検討専門委員会委員 (P-PAC)
大阪大学核物理研究センター実験課題採択専門委員会委員 (B-PAC)
SSRI-PNS collaboration 運営委員
4th nSHE Research Group Collaboration Meeting, Chair of LOC
FUSION23, Program Committee Member
研究会「低エネルギー重イオン反応と超重元素の科学」世話人
- 市川雄一： RIBF Users Executive Committee Chair
RIBF Users Meeting 2023 Organizer
停止・低速 RI ビームを用いた核分光同好会 (SSRI) 幹事
Fundamental Physics Using Atoms (FPUA) Board Member
FPUA2024 Organizer
第12回 停止・低速 RI ビームを用いた核分光研究会 (12th SSRI) 世話人
- 庭瀬暁隆： 日本放射化学会 若手の会・代表世話人
FUSION2023 Young Scientists Meetup Committee

受託研究・民間との共同研究

その他の活動と成果

JPSJ Most Cited Articles in 2023 に選出

M. Tanaka, S. Sakaguchi (上記2名が責任著者) *et al.*, “Probing Optimal Reaction Energy for Synthesis of Element 119 from $^{51}\text{V}+^{248}\text{Cm}$ Reaction with Quasielastic Barrier Distribution Measurement”, *Journal of the Physical Society of Japan*, **91**, 084201 (2022) に対して (2024年3月)

(田中聖臣・坂口聡志・郷慎太郎・内藤夏樹・長江大輔・庭瀬暁隆・森田浩介・鷺山広平)

プレスリリース「最先端宇宙観測技術で視る原子核の姿 —原子核からの「偏光」を捉える好感度カメラ」:

理化学研究所、東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構、九州大学、京都市大学 (2024年2月7日)

(郷慎太郎・市川雄一)

粒子系実験

研究室構成員

有賀智子 准教授
(基幹教育院) 山中隆志 助教

担当授業

- 力学概論演習
- 自然科学総合実験
- 基幹教育セミナー (2クラス)
- 課題協学科目
- システム科学基礎
- アプローチ科目 物理学 B
- アプローチ科目 物理学 C
- 共創プロジェクト

研究・教育目標と成果

- TeV エネルギー領域におけるニュートリノ反応断面積の初測定 (有賀)
欧州原子核研究機構 (CERN) の大型ハドロンコライダー (LHC) の陽子・陽子衝突に起因するニュートリノの測定において、これまで実験的に未開拓であった TeV エネルギー領域におけるニュートリノ反応断面積の初測定を目指した。主要なニュートリノ検出器である FASER ν 検出器の製造・運用を 2022 年に開始して以降、2023 年は 2 回のビーム照射を遂行し、約 32/fb のデータを蓄積した。エマルジョンフィルムの製造・性能の管理を名古屋大学への出張および九州大学にて実施してから CERN へ輸送し、暗室ファシリティにてモジュールを組み立て、地下トンネルにインストールしてビーム照射を実施した。その後の入れ換えで取り出したエマルジョンフィルムは現像して日本へ輸送した。高速読み出し装置を用いてフィルム全面の読み出しを行い、本研究グループを中心として共同研究機関でデータの解析を進めてき

た。2022年に設置したモジュールを解析し、加速器実験としては最高エネルギーの電子ニュートリノ反応、ミューニュートリノ反応の直接検出に成功した。そのデータを用いて500 GeVから2 TeVの領域における電子ニュートリノ・ミューニュートリノの反応断面積の初測定を実現させ、有賀准教授が主要著者・責任著者として論文を執筆した(論文の受理・発表に至ったのは次年度) [<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.133.021802>]。この測定は電子ニュートリノ4例、ミューニュートリノ8例を検出して実施したものであり、今後の研究によってそれらの統計を約150倍に上げるとともに新たにタウニュートリノを検出して様々な物理解析を進めていく。

発表論文

《原著論文》

- Search for dark photons with the FASER detector at the LHC, FASER Collaboration, Phys. Lett. B 848 (2024) 138378.
- Development of proton beam irradiation system for the NA65/DsTau experiment, DsTau Collaboration, JINST 18 (2023) 10, P10008.
- First direct observation of collider neutrinos with FASER at the LHC, FASER Collaboration, Phys. Rev. Lett. 131 (2023) 031801.

《Proceedings》

《その他の論文》

著書

講演

《海外での講演》

- Tomoko Ariga, New results on LHC neutrinos from the FASER experiment, 24th International Workshop on Neutrinos from Accelerators (NuFact 2023), 2023年8月(プレナリー).

《国内での講演》

- LHC ビーム軸方向でのニュートリノ研究および新粒子探索, 有賀智子, [IPNS workshop] 素粒子物理の今と未来, 2023 年 12 月 (招待).
- LHC-FASER2022 年データにおける電子ニュートリノ・ミューニュートリノ反応断面積測定の最新状況, 有賀智子, 有賀昭貴, 藤森春陽, 早川大樹, 稲田知大, 金井巧, 河原宏晃, 久下謙一, 中野敏行, 野中元哉, 大橋健, 奥井一暁, 音野瑛俊, 六條宏紀, 佐藤修, 田窪洋介, 日本物理学会 年次大会, 2023 年 9 月.
- LHC-FASER2022 年データにおける電子ニュートリノ反応解析の最新状況, 河原宏晃, 有賀昭貴, 有賀智子, 藤森春陽, 早川大樹, 稲田知大, 金井巧, 久下謙一, 大橋健, 中野敏行, 野中元哉, 奥井一暁, 音野瑛俊, 六條宏紀, 佐藤修, 田窪洋介, 日本物理学会 春季大会, 2024 年 3 月.
- LHC-FASER 実験における FASER ν 検出器のデータ評価, 奥井一暁, 有賀昭貴, 有賀智子, 藤森春陽, 早川大樹, 稲田知大, 金井巧, 河原宏晃, 久下謙一, 大橋健, 中野敏行, 野中元哉, 音野瑛俊, 六條宏紀, 佐藤修, 田窪洋介, 日本物理学会 春季大会, 2024 年 3 月.
- NA65/DsTau 実験における高運動量荷電チャームハドロン崩壊探索アルゴリズムの開発, 三浦真登, 有賀昭貴, 有賀智子, 早川大樹, 久下謙一, 中野敏行, 奥村虎之介, 六條宏紀, 佐藤修, 吉本雅浩, 日本物理学会 春季大会, 2024 年 3 月.
- LHC-FASER 実験の FASER ν 検出器におけるミューニュートリノ測定のためのミューオン識別手法の開発, 野中元哉, 有賀昭貴, 有賀智子, 藤森春陽, 早川大樹, 稲田知大, 金井巧, 河原宏晃, 久下謙一, 中野敏行, 大橋健, 奥井一暁, 音野瑛俊, 六條宏紀, 佐藤修, 田窪洋介, 日本物理学会 年次大会, 2023 年 9 月.
- LHC-FASER 実験における新粒子探索の現状と将来の展望, 田窪洋介, 有賀昭貴, 有賀智子, 稲田知大, 大橋健, 音野瑛俊, 河原宏晃, 久下謙一, 佐藤修, 中野敏行, 早川大樹, 六條宏紀, 日本物理学会 年次大会 2023 年 9 月.

外部資金

《文部科学省科学研究費補助金》

- 科研費, 基盤研究 (B), 代表, LHC 超前方における高エネルギー 3 世代ニュートリノの研究.
- 科研費, 基盤研究 (A) 分担, LHC ニュートリノを用いたレプトン・クォーク相互作用の研究.

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

他大学での研究と教育

学部 4 年生卒業研究

該当なし (学部は担当していない)

修士論文

該当なし (2024 年度から受け入れ)

博士論文

外国人留学生の受け入れ

学外での学会活動

- 幹事, 日本写真学会, 2022 年から現在.
- 年次大会 実行委員, 日本写真学会, 東京工業大学, 2023 年 7 月.

受託研究・民間との共同研究

2021 年 10 月 2~2026 年 10 月, FASER ν : detecting high-energy neutrinos at the LHC (受託研究), University of California, Irvine.

その他の活動と成果

大学の学問・研究を紹介するサイト「みらいぶっく」の活動に協力した。

物性理論

研究室構成員

福田順一 教授

松井淳 講師

多羅間充輔 助教

《 大学院 博士課程 》

米澤 弦起 金子 甲二郎 松清 洋輝

《 大学院 修士課程 》

藤原 智仁 山脇 郁也 小倉 智大 小田 響己

北本 光 中村 草平

《 学部 卒業研究生 》

松本 岳士 松本 宇生 尾中 裕紀 豊島 翼

Qi Zhiping

担当授業

福田順一: 非平衡物理学, 熱力学 A,B, 電磁気学基礎, 熱力学基礎, 物理学ゼミナール

松井淳: 量子統計物理学, 物理数学 II, 力学基礎演習

多羅間充輔: 力学・同演習, 統計力学 I・同演習, 最先端物理学

研究・教育目標と成果

コレステリックブルー相の双晶形成のダイナミクス (福田順一)

立方対称性を有するコレステリックブルー相液晶は、構造相転移の結果として異なる方位のブルー相格子が共存する双晶構造を示す。液晶の配向秩序を表すテンソルの秩序変数に関するランジュバン型の運動方程式の数値計算結果について、機械学習による構造の同定を行うことで双晶構造形成のダイナミクスを明らかにする試みを開始した (産業技術総合研究所 高橋和義博士との共同研究)。

円形井戸中のネマチック液晶が示す秩序構造 (福田順一)

円形井戸中の液晶が示す秩序構造について昨年度行った数値計算の結果について、共同研究先の実験結果とともに原著論文にまとめ公表した (中央大学 片山建二教授のグループとの共同研究)。

空間拘束下，障害物存在下のアクティブマターの分子シミュレーション（金子甲二郎，福田順一）

個々のバクテリアを自己駆動する棒状の粒子としてモデル化し，そのような粒子の集団運動を分子シミュレーションによって調べた．境界において運動が抑制されたクラスターが形成される傾向を緩和するために，境界に接する方向に回転する相互作用の導入や粒子同士の重なり合いを許容するモデルへの変更を行なった．同じ半径の円が2つ重なった双子型井戸による拘束時に，モデルの変更にも関わらず動かないクラスターがロバストに維持されることと，相互作用による回転が左右いずれかの方向にバイアスがかかった状況ではエッジ流が生じることを見出した．

また，強化学習を用いて上記の棒状粒子に秩序形成に適した振る舞いを学習させ，自身の挙動を制御できるアクティブマターの構築を試みる共同研究に着手した．先行研究では周囲の粒子と同一方向に推進するような挙動を学習させ，同一方向に動く集団の形成に成功していた．我々は上記の空間拘束下，障害物存在下におけるそれらの振る舞いの探究や，アクティブワークという新たな報酬の導入に取り組んでいる．

エクストラサイトモデルに基づくトポロジカル四重極相の理論研究（米澤弦起）

トポロジカル四重極相が出現するタイトバインディングモデル (BBH モデル) において主要な役割を果たしているホッピングの符号の反転を，エクストラサイトモデルを用いて摂動的に実現する方法について研究を行った．我々が考案したエクストラサイトモデルにおいても，元の BBH モデルが有していた Wannier バンドの構造は変化せず，コーナー状態が出現することを数値的に示した．また，Brillouin-Wigner 形式に基づいてゼロエネルギー解 (バンドトポロジーの切り替わり点) が存在するための条件を解析的に求めた．さらに，フォトニック結晶を中心としたメタマテリアルへの応用の研究にも着手した (物質・材料研究機構の苅宿俊風博士との共同研究) ．

散逸量子多体系における電荷ポンプの理論研究（米澤弦起）

散逸下の量子系を記述する方程式として GKLS 方程式を採用し，散逸があるような量子多体系における電荷ポンプに関する研究を行った．2バンドの絶縁体に現象論的な散逸が加わっているような一般的なセットアップの元で，GKLS 方程式の解析解を計算し，それらに断熱近似を施すことで，散逸量子多体系における断熱電荷ポンプの一般表式を導出した．そして，その一般表式が散逸のない極限では，通常の Thouless ポンプの議論で得られる表式と一致することを確かめた．また，Thouless ポンプを示す具体的なモデルとして Rice-Mele モデルを採用し，電荷ポンプの外場に対する周波数依存性を計算することで，上記の解析解が数値計算の結果と一致していることを示した．さらに，それらの研究の応用として，磁性 Weyl 半金属に関する研究にも新たに着手した (東京工業大学の石塚大晃博士，九州大学の野村健太郎教授との共同研究) ．

空間拘束下のアクティブマターの連続体シミュレーション（松清洋輝，福田順一）

前多研究室で行われている、バクテリア懸濁液の実験的研究に触発され、空間拘束下のアクティブ流体に関する理論およびシミュレーションによる研究を行なった。具体的には、Toner-Tu-Swift-Hohenberg 方程式と呼ばれる、バクテリア集団の振舞を記述する連続体方程式を、すべり境界条件下で数値的に解く手法を提案し、それをを用いたシミュレーションを行なった。シミュレーションの結果、境界における流れの向きが時間的に振動するという結果を得、パラメータを変化させた時に振動の様子がどのように変化するかを調べた。これらの成果を原著論文にまとめ、投稿した。

ネマチック液晶の電気対流のシミュレーション（藤原智仁，福田順一）

ネマチック液晶からなる液晶セルに電場を印加した際に生じる電気対流のダイナミクスの連続体シミュレーションを行なった。液晶配向の歪みによって生じる電気分極（フレクソエレクトリック効果）の影響に特に着目し、フレクソエレクトリック効果や誘電率の異方性の符号が液晶対流のロールパターンなどの特徴的な運動にどのような影響を与えるかを調べた。

二種細胞集団の相分離ダイナミクス（山脇郁也，福田順一）

2種類の細胞からなる系においてその相分離に細胞形状がどのように影響を与えるかを考察すべく、細胞の種類を表すスカラー場、細胞の集団運動を表す速度場、および細胞形状を表すテンソル場を用いた連続体理論の構築を試みた。速度場の方程式内の弾性ストレスの項に、細胞形状を表すテンソル場がどのような形で現れるかを定式化した。数値計算の結果、双連結構造や液滴の成長など、流体系相分離と類似した現象が見られることを確認した。

複素ランジュバン法に基づく高分子系の統計力学（小倉智大，福田順一）

高分子系のメソスケールの理論としてよく用いられている自己無撞着場の方法において通常取り入れられていないゆらぎの影響を取り入れた理論として、複素ランジュバン法を用いて系の分配関数を評価する方法がある。そのような手法について数値実装を行い、相分離界面の構造に熱揺らぎの強さの変化が与える影響について系統的な計算を実行した。

スメクチック液晶の連続体力学（小田響己，福田順一）

最近実験的に発見された、層状の秩序を有する液晶（スメクチック液晶）で層と垂直な方向の極性を持つものにおける位相欠陥を含む秩序形成の理解を目指し、配向の秩序変数、層秩序の存在を表す秩序変数、誘電分極を取り入れた連続体理論の構築を試みるとともに、極性のあるスメクチック液晶、極性のないスメクチック液晶について、最初の2つの秩序変数のダイナミクス、欠陥構造形成に関する数値計算を行なった。

分子シミュレーションによる高分子マイクロレオロジーの研究（北本光，松井淳，福田順一）

高分子のマイクロレオロジーについて直接的な理論的知見を得ることを目標に、モデ

ル高分子の集合とプローブ粒子からなる系の分子シミュレーションを試みた。

Crooks 揺らぎの定理の数値シミュレーション (松本岳士, 松井淳, 福田順一)

プローブ粒子と溶媒分子からなる系におけるプローブ粒子の運動によるエネルギー散逸を分子シミュレーションにより直接評価することで、非平衡統計力学の重要な定理である Crooks の揺らぎの定理の成立を確かめた。

人新世における地球システムのダイナミクス (Qi Zhiping, 福田順一, 松井淳)

人新世における地球システムのダイナミクスを記述する力学系モデルに関する先行研究の調査を行い、それらの時間発展方程式を直接解くとともに、散逸項と時間に比例する外場の項を加えたハミルトン系の性質について考察を行なった。

向きの拘束された流体のダイナミクス (松本宇生, 松井淳)

速度の向きがランダムな1軸方向に拘束された分子で構成された流体について、分子動力学シミュレーションを用いて、平均2条変位を計算した。長時間領域において、異常拡散がみられることを見出した。

ランダムウォークを用いた電気抵抗の計算 (豊島翼, 松井淳)

電気抵抗の合成抵抗の計算は、一般的にキルヒホッフの法則が用いられる。一方、電流を回路を流れる電子のホッピングとみなし、確率論的に取り扱う方法でも計算できる。2つの方法が等価であることを具体例を用いてまとめた。

アクティブダイナミクスの熱力学的再考 (松井淳)

先進ポテンシャルを加えた非ハミルトンモデル系が Viscek モデルのような集団運動を引き起こすことを見出した。そのときの散逸を等価な熱力学過程を用いて見積もった。

エレベータの同期ダイナミクス (多羅間充輔)

確率的な人の流入により駆動されるエレベータは、二台あるときには、ある流入率以上で同相同期することが知られている。二台以上のエレベータがあるときに同期ダイナミクスが変化することを発見した。この同期メカニズムについて詳細な解析を進めた。

基盤上の細胞運動のメカノセンシング (中村草平, 多羅間充輔)

基盤上を這う細胞は、細胞内の化学反応が力学的な力に変換されることで空間的に運動する。細胞は周囲の環境の状態を感知して運動を制御する。その一つに、周囲の「硬さ」に対する応答が実験的に知られている。このような細胞のメカノセンシングのメカニズムを、細胞の這走運動に対するメカノケミカルモデルを用いて、理論的に研究した。

変形する自己駆動粒子のモデル推定 (入倉大輔, 多羅間充輔)

自己推進液滴のように形状を変化しながら自発的に運動する粒子に対して、運動データからその支配方程式を構築するデータ駆動型の研究を進めた。モデル推定のための

手法についての調査を進めて知見を得るとともに、その実装を行なった。手法の有効性を確認するために、モデルを数値的に解くことで作成したデータに対して推定を行ない、具体的なデータの性質に対してどのような注意点があるかやよりよく推定するための工夫について理解を進めた。

走化性マイクロスイマーのダイナミクス (多羅間充輔)

周囲の化学濃度場に応じて運動を変化させるマイクロスイマーの走化性について理論研究を進めた。マイクロスイマーの運動に対する化学濃度場の影響を明らかにするために、回転対称な濃度場中にスイマーを運動するときの散乱を、運動方程式を解析的に解くことで調べた。(デュッセルドルフ大学 H. Löwen 教授との共同研究)

生体高分子の輸送ダイナミクス (多羅間充輔)

クロマチンのような生体高分子に分子モーターが結合して力を生成するときの、高分子の輸送について理論的に調べた。分子モーターの力生成よりも高分子の緩和時間が短いとき、高分子は各時刻で十分に緩和しているとして、高分子の分配関数を計算し、高分子の自己組織化構造について特徴づけることに成功した。(ウォーリック大学 M. Turner 教授との共同研究)

発表論文

《 原著論文 》

K. Katayama, T. Yoshimura, S. Yamashita, H. Teratani, T. Murakami, H. Suzuki and J. Fukuda,
“Formation of Topological Defects at Liquid / Liquid Crystal Interfaces in Micro-Wells Controlled by Surfactants and Light”
Soft Matter **19** (2023) 6578–6588.

S. Sekine, M. Tarama, H. Wada, M. M. Sami, T. Shibata, and S. Hayashi,
“Emergence of periodic circumferential actin cables from the anisotropic fusion of actin nanoclusters during tubulogenesis”
Nature Communications (2024) 15:464.

《 その他の論文 》

H. Matsukiyo and J. Fukuda,
“Oscillating edge current in polar active fluid”
arXiv:2312.08788

多羅間充輔, 山本量一,
“遊走メカニズムを数理モデルから理解する”
生物物理 **63** (6), 306-309 (2023)

著書

講演

《 海外での講演 》

J. Fukuda
“Numerical study of martensitic transformation of a cubic blue phase liquid crystal”
Soft Matter Seminar (2024年3月19日, リュブリャナ大学 (スロベニア),
依頼講演)

J. Fukuda
“Cholesteric blue phase liquid crystal: Numerical studies of structural and optical properties”
Joint workshop: Physics Departments of NTNU and KU (臺灣師範大學、日本九州大學物理系雙邊研討會) (2023年11月17日, 台湾, **依頼講演**)

M. Tarama
“Self-organization of dynamic network structure of mesoderm cells”
Seminar of Data assimilation - the collaborative research centre SFB1294
(2024年3月6日, the University of Potsdam (ドイツ), **依頼講演**)

M. Tarama
“Pattern formation of actin cytoskeleton around membranes”

MBI Seminar (2024年1月16日, Mechanobiology Institute, National University of Singapore, **依頼講演**)

《国内での講演》

福田順一

「コレステリックブルー相の構造相転移の連続体理論によるシミュレーション」

2023年日本液晶学会討論会 (2023年9月11日, 東京理科大学神楽坂キャンパス)

J. Fukuda

“Numerical study of the structural and optical properties of cholesteric blue phase liquid crystal”

The 7th International Soft Matter Conference (2023年9月5日, 大阪, *Keynote talk*)

J. Fukuda

“Simulation of structural relaxation and phase transition of liquid crystalline blue phases”

The 9th International Discussion Meeting on Relaxations in Complex Systems (2023年8月13日, 千葉 *Invited Talk*)

福田順一

「液晶の秩序構造とその光学的性質に関する数値的研究」

物性研究所スパコン共同利用・CCMS 合同研究会「計算の時代における物性科学」(2023年4月4日, 東大物性研, **依頼講演**)

松清洋輝, 福田順一

“Oscillating edge current in polar active fluid”

Active Matter Workshop 2024 (アクティブマター研究会) (2024年1月26日, 明治大学, 口頭発表)

金子甲二郎, 福田順一

“Simulation of self-propelled rods restricted by curved geometries”

Active Matter Workshop 2024 (アクティブマター研究会) (2024年1月27日, 明治大学, ポスター発表)

金子甲二郎, 福田順一

「曲がった境界のある領域中の自己駆動棒の数値シミュレーション」
第11回ソフトマター研究会 (2023年12月19日, 東京大学生産技術研究所,
ポスター発表)

松清洋輝, 福田順一

「境界存在下でバクテリア乱流が示すエッジカレントの振動について」
第11回ソフトマター研究会 (2023年12月19日, 東京大学生産技術研究所,
ポスター発表)

山脇郁也, 福田順一

「細胞形態テンソルを用いた細胞組織の相分離モデル」
第11回ソフトマター研究会 (2023年12月19日, 東京大学生産技術研究所,
ポスター発表)

金子甲二郎, 福田順一

「曲がった形状の領域内の自己駆動棒の数値シミュレーション」
第129回日本物理学会九州支部例会 (2023年12月2日, 長崎大学, 口頭発表)

松清洋輝, 福田順一

「境界存在下でバクテリア乱流が示すエッジカレントの振動について」
第129回日本物理学会九州支部例会 (2023年12月2日, 長崎大学, 口頭発表)

藤原智仁, 福田順一

「ネマチック液晶の電気対流シミュレーション」
第129回日本物理学会九州支部例会 (2023年12月2日, 長崎大学, 口頭発表)

山脇郁也, 福田順一

「細胞形態テンソルを用いた2種細胞組織の相分離の研究」
第129回日本物理学会九州支部例会 (2023年12月2日, 長崎大学, 口頭発表)

H. Matsukiyo and J. Fukuda

“Oscillating Edge Current in Toner-Tu-Swift-Hohenberg Active Fluid”
Kick-off meeting of Advanced core-to-core network for the physics of self-
organizing active matter (2023年9月12日, 京都, ポスター講演)

K. Kaneko and J. Fukuda

“Simulation of Self-propelled Rods with Curved Boundaries”

Kick-off meeting of Advanced core-to-core network for the physics of self-organizing active matter (2023年9月12日, 京都, ポスター講演)

F. Yamawaki and J. Fukuda

“Study of phase separation of tissue cells using a cell morphology tensor”

Kick-off meeting of Advanced core-to-core network for the physics of self-organizing active matter (2023年9月12日, 京都, ポスター講演)

H. Matsukiyo and J. Fukuda

“Oscillating Edge Current in Toner-Tu-Swift-Hohenberg Active Fluid”

The 7th International Soft Matter Conference (2023年9月6日, 大阪, ポスター講演)

K. Kaneko and J. Fukuda

“Simulation of Self-propelled Rods with Curved Boundaries”

The 7th International Soft Matter Conference (2023年9月6日, 大阪, ポスター講演)

F. Yamawaki and J. Fukuda

“Study of phase separation of tissue cells using a cell morphology tensor”

The 7th International Soft Matter Conference (2023年9月6日, 大阪, ポスター講演)

G. Yonezawa, T. Kariyado and J. Fukuda

“Realization of topological states in a chiral honeycomb lattice model”

28th International Conference on Statistical Physics, Statphys28 (2023年8月8日, 東京, ポスター講演)

K. Kaneko and J. Fukuda

“Simulation of Self-propelled Rods with Curved Boundaries”

28th International Conference on Statistical Physics, Statphys28 (2023年8月7日, 東京, ポスター講演)

H. Matsukiyo and J. Fukuda

“Oscillating Edge Current in Toner-Tu-Swift-Hohenberg Active Fluid”

28th International Conference on Statistical Physics, Statphys28 (2023年8月8日, 東京, ポスター講演)

多羅間充輔

「細胞運動のアクティブマター物理学」
非線形プラズマ科学セミナー（2023年12月13日，オンライン）

Mitsusuke Tarama

“Microphase separation of actin cytoskeleton during tubulogenesis”
Active Matter Workshop 2024（アクティブマター研究会）（2024年1月26日，明治大学，口頭発表）

多羅間充輔

“基盤上の細胞運動のメカノケミカルモデル”
生体運動研究合同班会議 2024（2024年1月5日，理化学研究所 神戸キャンパス，口頭発表）

M. Tarama

“Dynamic meshwork structure formation of adhesive active cells”
Kick-off meeting of Advanced core-to-core network for the physics of self-organizing active matter（2023年9月12日，京都，ポスター講演）

M. Tarama, S. Sekine, T. Shibata, S. Hayashi

“Microphase separation of actin cytoskeleton during tubulogenesis”
The 7th International Soft Matter Conference（2023年9月4日，大阪，口頭発表）

M. Tarama

“Dynamics and the mechanics of a motor-driven filamentous system confined by membranes”
28th International Conference on Statistical Physics, Statphys28（2023年8月10日，東京，口頭発表）

外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》

福田順一:

基盤研究(B)「キラル液晶の秩序構造に基づくトポロジカルフォトリニクス
の理論的研究」(研究代表者，継続)

多羅間充輔:

若手研究「細胞骨格と細胞の協同的パターン形成と機能発現のアクティブマター物理学」(研究代表者, 継続)

国際共同研究加速基金(国際共同研究強化(B))「微小管メカニクスが誘導する細胞極性パターンニング」(分担, 継続)

基盤研究(C)「アクチン微小集合体を起点とした組織スケールの均一性獲得原理の解明」(分担, 継続)

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

福田順一:

成長型中小企業等研究開発支援事業 (Go-Tech 事業) 「スマートグラスなどに内蔵する光方向を自在に制御する「液晶回折素子」測定システム開発」(分担)

令和5年度物質・デバイス領域共同研究拠点共同研究課題「液晶が示す秩序構造とその機能, 安定性に関する理論的研究」(代表)

福田順一, 多羅間充輔:

JSPS 研究拠点形成事業 (Core-to-core Program) 「自己組織化するアクティブマターの物理学国際研究ネットワーク」(参画)

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

他大学での研究と教育

学部4年生卒業研究

松本岳士:(指導教員:松井淳, 福田順一): Crooks 揺らぎの定理の数値シミュレーション

松本宇生:(指導教員:松井淳): 向きの拘束された流体のダイナミクス

尾中裕紀:(指導教員:多羅間充輔): 複数エレベーターによる同期現象のシミュレーション

豊島翼:(指導教員:松井淳): ランダムウォークで求める抵抗

Qi Zhiping : (指導教員 : 福田順一, 松井淳) : 人新世における地球システムのダイナミクス

修士論文

藤原智仁 : ネマチック液晶における電気対流シミュレーション

山脇郁也 : 二種細胞集団の相分離ダイナミクス

小倉智大 : 場の理論に基づく高分子系の相分離現象

博士論文

外国人留学生の受け入れ

学外での学会活動

福田順一:

Associate Editor of *Frontiers in Soft Matter*

Editorial Board Member of *Liquid Crystal Reviews*

Editorial Board Member of *Scientific Reports*

日本物理学会代議員

Local committee member of the 10th Japanese-Italian Workshop on Liquid Crystals (JILCW2024) Local organizing committee member of the 7th International Soft Matter Conference

Symposium Leader of the 9th International Discussion Meeting on Relaxations in Complex Systems (9IDMRCS)

多羅間充輔:

日本物理学会領域1 2 運営委員

Local working group member of the 7th International Soft Matter Conference

アクティブマター研究会 2024 世話人

受託研究・民間との共同研究

その他の活動と成果

福田順一: 九州大学出版会理事, オープンキャンパスにおける講演(入試の紹介)

松井淳: 過年度生等の学習支援(教育支援室), オープンキャンパス世話人(開催2023年8月6日)

統計物理学

研究室構成員

野村 清英 准教授

《 大学院 博士課程 》

白石 修一 小野山 幸輔

《 大学院 修士課程 》

用松 大希

《 学部 卒業研究生 》

渡辺 玄樹 高本 唯

担当授業

統計力学 II(学部), 物性物理学 II(学部), 物理学ゼミナール B(学部)

量子統計物理学 (大学院)

研究・教育目標と成果

1. 1 イオン異方性を伴う $S=1$ XXZ スピン鎖と共形場理論 (白石, 野村):

1 イオン異方性を伴う $S=1$ XXZ スピン鎖には、強磁性相、反強磁性 (Neel) 相の長距離秩序がある相の他、Haldane 相、Large D 相のような長距離秩序がなく相関距離有限な相や、XY1, XY2 相のような長距離秩序はないが相関距離が発散している相がある。

このうち、特に XY1 相, XY2 相, Haldane 相, Neel 相の 4 つの相について調べた。扱ったモデルではパラメータ 2 つなので、2 相の相境界は線、3 相は点で接するが、4 相以上の共存は無いはずである。ところが Schulz (1986) はボソン化理論で、XY1 相, XY2 相, Haldane 相, Neel 相の 4 つの相が 1 点で交わると予想した。しかし最近の数値計算で、4 相が 1 点で交わるようには見えないことが指摘された (Tonegawa et al., (2023))。

この問題について我々は、従来の数値計算手法に問題があると考え、共形場理論をつかった新しい数値計算方法を開発し、4相が1点で交わることを確かめた。

また、4重臨界点については、これまで見逃されていた対称性を考慮すると可能なことを議論した。

2. スピンが大きな系における非自明な $SU(2)$ 対称性 (小野山, 野村):

$S=1$ XY 系に1イオン異方性があるモデルで非自明な $SU(2)$ 対称性が知られていた。これを発展させ、 $S=1$ bilinear-biquadratic スピン鎖でも非自明な $SU(2)$ 対称性を調べている。また、 $S=3/2$ スピン鎖でも非自明な $SU(2)$ 対称性があることを見出した。これらは Berezinskii-Kosterlitz-Thouless 転移などに関係することが予想されるが、他にも特異なことがあるかもしれない。

3. $S=1/2$ XXZ スピン鎖と量子群 (用松, 野村):

可積分な $S=1/2$ XXZ スピン鎖には、特殊な異方性パラメーターで量子群と呼ばれる対称性が成り立つ。これについて、2003年の出口先生の論文を読み進めた。

また非可積分な次近接 $S=1/2$ XXZ スピン鎖では、量子群が成立する複数の点がガウシアン固定線でつながると予想し、数値計算に着手した。

発表論文

《原著論文》

《その他の論文》

著書

講演

《海外での講演》

《国内での講演》

1. “S=1 XXZ chain with single ion anisotropy and conformal field theory”
白石修一, 野村清英
STATPHYS28 [PSb-33] (2023年8月、東大)
2. “A new method to calculate transition lines near the Ashkin-Teller multi-critical point”
野村清英, 守屋俊二
STATPHYS28 [PSb-34] (2023年8月、東大)
3. “Critical phenomena in the vicinity of the SU(3) symmetric tri-critical point of a spin-1 chain”
益子通生流, 野村清英
STATPHYS28 [PSa-48] (2023年8月、東大)
4. 「1 イオン異方性を伴う S=1XXZ スピン鎖の多重臨界点」
白石修一, 野村清英
第19回量子スピン系研究会 [21-6](2024年2月、福井大学)

外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》

1. 木村 崇 (代表者)、大西 紘平、野村 清英 (分担者)、基盤 (S),
「回転スピン流による再構成可能な超伝導量子デバイスの創成」

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

他大学での研究と教育

学部4年生卒業研究

- 渡辺 玄樹: 「Rydberg 状態の量子論」
- 高本 唯: 「量子エンタングルメントについて」

修士論文

1. 緒方 健人：(指導教員, 野村 清英)：「 $S=1$ 量子スピン鎖における非線形磁化率」
2. 小野山 幸輔：(指導教員, 野村 清英)：「 $S=1$ スピン系における特殊な $SU(2)$ 対称性」

博士論文

益子 通生流 (指導教員, 野村 清英)： “ Critical phenomena in the vicinity of the $SU(3)$ symmetric tri-critical point of a spin-1 chain”

外国人留学生の受け入れ

学外での学会活動

受託研究・民間との共同研究

その他の活動と成果

凝縮系理論

研究室構成員

野村健太郎 教授

工藤耕司 助教

《 博士研究員 》

仲井良太

《 大学院 修士課程 》

目黒智成

《 学部 卒業研究生 》

古庄 優汰 山崎 一朗

《 研究生 》

木村春貴 譚湘

担当授業

現代物理学基礎（野村健太郎），原子分子の量子力学（野村健太郎），統計力学1・同演習（野村健太郎），電磁気学基礎・熱力学基礎演習（工藤耕司），物理学総合演習（工藤耕司）

研究・教育目標と成果

フェリ磁性ワイル半金属の有効模型（目黒智成，野村健太郎）

磁気ワイル半金属の候補材料である補償型フェリ磁性逆ヘウスラー格子 Ti_2MnAl を用いた有効タイトバインディングモデルが提案されている。フェルミ準位近傍のエネルギースペクトル、ワイル点の配置、異常ホール伝導率が計算された。我々は、ワイル点のエネルギーにおいて軌道磁化は有限であるが、全スピン磁化は消失することを見出した。各サイトにおける磁気モーメントは軌道磁化と関連し、外部磁場によって制御可能である。

多層系における高次トポロジカル超伝導相（仲井良太，野村健太郎）

高次トポロジー相は、ギャップを持つ物質相であり、ギャップレスなコーナーやヒンジモードを持つ。超伝導体の場合、これらのコーナーやヒンジモードはギャップレスなマ

ヨラナモードまたはマヨラナ零点モードとなる。3次元の高次トポロジ超伝導体を構築するために、面内ゼーマン結合下のトポロジカル絶縁体/超伝導体の多層構造を考慮した。その結果、3種類の異なる高次トポロジ超伝導相を見出した。マヨラナヒンジ平坦バンドを持つ二次元トポロジ超伝導相、表面にマヨラナコーンとマヨラナヒンジアークを持つ二次元ディラック超伝導相、そしてドラムヘッド表面状態とマヨラナヒンジアークを持つノーダルライン超伝導相である。

Co₃Sn₂S₂ の常磁性-強磁性転移によるスピン電荷変換の増強 (野村健太郎)

Co₃Sn₂S₂ (CSS) はシャンドイト化合物の一つで、強磁性転移温度 (T_C) 以下で磁気ワイル半金属の候補となる。本研究では、CSS 薄膜を用いた CSS/Cu/CoFeB 三層膜のスピントルク強磁性共鳴 (ST-FMR) を測定し、電流とスピン電流の変換の温度依存性を調査した。 T_C 以上では常磁性 CSS のスピホール効果と CoFeB の異方性磁気抵抗 (AMR) による信号が観測され、 T_C 以下では巨大磁気抵抗 (GMR) も寄与することが確認された。 $T < T_C$ でスピン電荷変換効率が増加し、CSS の強磁性相転移が高効率なスピン電荷変換を促進することが示された。理論計算でも、磁気モーメントの出現に伴いスピホール伝導率が増加することが実験と一致している。

強磁性ワイル半金属 Co₃Sn₂S₂ における磁気スピホール効果の理論 (野村健太郎)

強磁性秩序を有する積層カゴメワイル半金属 Co₃Sn₂S₂ (CSS) におけるスピホール効果を有効モデルに基づき解析した。スピン軌道相互作用として Kane-Mele 型と交替 Rashba 型の 2 種類を考慮した。前者はカゴメ面内にある Sn 元素に由来し、後者は面間の Sn 元素に由来する。スピホール流として、カゴメ格子に対して面内方向に流れるもの (面内スピホール流) と積層方向に流れるもの (面直スピホール流) の 2 種類に着目した。これらのスピホール流のスピホール伝導率が磁気モーメントの方向に応じて劇的に変化することを明らかにした。特に、交替 Rashba 型スピン軌道相互作用によって誘起する、面直スピホール流は表面スピン蓄積を誘発する可能性があり、これはスピン軌道トルクによる垂直磁化スイッチングに用いられることを指摘した。

発表論文

《 原著論文 》

T. Seki, Y.-C. Lau, J. Ikeda, K. Fujiwara, A. Ozawa, S. Iihama, K. Nomura, A. Tsukazaki, “ Enhancement of Spin-Charge Conversion Efficiency for Co₃Sn₂S₂ across Transition from Paramagnetic to Ferromagnetic Phase ”, Phys. Rev . Research 5,

013222 (2023).

Yong-Chang Lau, Junya Ikeda, Kohei Fujiwara, Akihiro Ozawa, Jiaxin Zheng, Takeshi Seki, Kentaro Nomura, Liang Du, Quansheng Wu, Atsushi Tsukazaki, and Koki Takanashi, “Intercorrelated anomalous Hall and spin Hall effect in kagome-lattice $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ -based shandite films ” Phys. Rev. B 108, 064429 (2023). [Editors’ Suggestion]

Ryota Nakai, Kentaro Nomura, “ Higher-order topological superconductor phases in a multilayer system ” Phys. Rev. B 108, 184517 (2023).

Akihiro Ozawa, Koji Kobayashi, and Kentaro Nomura, “Effective model analysis of intrinsic spin Hall effect with magnetism in stacked-kagome Weyl semimetal $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ ” Phys. Rev. Applied 21, 014041 (2024).

Tomonari Meguro, Akihiro Ozawa, Koji Kobayashi, Kentaro Nomura, “Effective Tight-Binding Model of Compensated Ferrimagnetic Weyl Semimetal with Spontaneous Orbital Magnetization ” J. Phys. Soc. Jpn. 93, 034703 (2024).

《 その他の論文 》

著書

講演

《 海外での講演 》

《 国内での講演 》

野村健太郎, “磁性ワイル半金属におけるスピン電磁応答の理論”, 日本物理学会年次大会シンポジウム「磁性ワイル物質の最近の進展」2023年9月17日 東北大学

外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

CREST トポロジカル材料科学に基づく革新的機能を有する材料・デバイスの創出（上田正仁総括）トポロジカル機能界面の創出
主たる共同研究者：野村健太郎（研究代表者：塚崎敦）

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)
なし

他大学での研究と教育

野村健太郎：東北大学と磁性ワイル半金属の共同研究を行い、スピン流の理論解析を担当した。

学部4年生卒業研究

目黒智成：(指導教員，野村健太郎)：フェリ磁性ワイル半金属の有効模型構築

修士論文

なし

博士論文

なし

外国人留学生の受け入れ

なし

学外での学会活動

東北大学金属材料研究所計算材料学センター共同利用委員

受託研究・民間との共同研究

なし

その他の活動と成果

なし

数理物理

研究室構成員

成清修 准教授

担当授業

非線形物理学 (成清修)、相転移の統計力学 (成清修)、物理学総論 (成清修)、教職実践演習 (成清修)

研究・教育目標と成果

ホール伝導度とフェルミ面の曲率の関係を明らかにした (成清修)

昨年度までに、金属のホール伝導度をフェルミ面の曲率で表現するプロジェクトを完結させた。これは、Tsuji が立方晶の場合に見出した表現を任意の結晶に対して拡張するものであった。他方、Haldane は Ong が 2 次元の場合に見出した表現を拡張しようとして失敗した。これら二つの表現の違いについて、その後理解できたので、すでに出版していた論文の arXiv 版に v2 として加えた。さらに、Ong の面積因子は Peierls の面積因子と関連付けられることに気づき、この考察を他の arXiv 論文に v2 として加えた。Tsuji の表現はフェルミ面の曲率を見ているが、Ong と Peierls の表現は、曲率とは直接には関係しない。この点を指摘した先例は無く、Haldane の失敗は、この区別ができていなかったことによるものと思われる。

[その他の論文]

曲がった時空中における量子論の圏論的定式化を行いつつある (成清修)

最近、Witten 等が、曲がった時空中における観測者の役割を接合積を用いて表現し注目されている。しかし、代数的場の量子論の業界では、接合積が観測状況の記述となっていることは、以前から、Ojima 等が主張していたことである。昨年度、この点について注意喚起を行った。今年度は、観測者の役割について、さらに新しい考察を加えた。特に、相対論的因果構造の全体である III 型 von Neumann 環が、観測者にとっては II 型に見える仕掛けを明らかにした。

[その他の論文]

授業の教材を公開した (成清修)

「物理学総論」の講義ノートのうち電磁気学に関する補足を QIR で公開した。

物理学総論：補足 (<https://hdl.handle.net/2324/7159638>)

「物理学入門：エントロピーについて」の講義ノートのうちマクスウェルのデモンに関する説明を拡充し QIR で公開した。

Maxwell's Demon: A Digest (<https://hdl.handle.net/2324/7157421>)

Maxwell's Demon: More about MATH (<https://hdl.handle.net/2324/7157980>)

Maxwell's Demon: More about PHYS (<https://hdl.handle.net/2324/7159642>)

発表論文

《原著論文》

《その他の論文》

Observers and Crossed Products

Osamu Narikiyo

QIR(<http://hdl.handle.net/2324/6786349>)

Geometrical interpretation of Hall conductivity in metals

Osamu Narikiyo

arXiv:2211.05761v2

Fermi-Surface Curvature and Hall Conductivity in Metals

Osamu Narikiyo

arXiv:2011.04421v2

著書

講演

《海外での講演》

《国内での講演》

外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

他大学での研究と教育

学部4年生卒業研究

修士論文

博士論文

外国人留学生の受け入れ

学外での学会活動

受託研究・民間との共同研究

その他の活動と成果

磁性物理学

研究室構成員

光田 暁弘 准教授

《 大学院 修士課程 》

中島 怜 横枕 拓八 木村 哲平 田坂 啓悟

《 学部 卒業研究生 》

大谷 峻人 松田 悠太

担当授業

物性物理学 I (光田暁弘)、電磁気学基礎 (光田暁弘)、熱力学基礎 (光田暁弘)、磁性体物理学 (光田暁弘)

研究・教育目標と成果

Eu 系価数揺動物質の単結晶育成と化学的圧力および静水圧力効果 (光田暁弘、中島怜、田坂啓悟)

Eu 化合物における 4f 電子の不安定性に起因する価数揺動現象に注目して研究を行っている。本年度は、Eu 系では例外的に中間価数的な基底状態を持ち、重い電子的な振舞を示す EuNi_2P_2 系に注目し、Ni サイトの Pt 置換、P サイトの As 置換に対する電子状態の影響を調べた。これらの置換系試料の作製に成功し、Eu が価数揺動状態から、磁気秩序状態へ変化する様子を確認した。両置換系とも電子濃度一定のまま格子体積を膨らませる効果 (負の圧力効果) があり、磁性的な Eu^{2+} 方向への価数変化に対応する変化と見なせる。また、同様の負の圧力効果で反強磁性の出現が報告されていて、同時にホールドープしている Ge 置換系と比較するため、静水圧力効果を測定した。As 置換系は低温領域の価数揺動状態だけが変化し、高温領域はほとんど変化が見られないが、Ge 置換系は全温度領域にわたって価数状態が変化していることを示唆する結果を得た。次年度はキャリアドープ効果の価数への影響を更に調べて行く。また、価数転移を示す $\text{Eu}(\text{Rh}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{Si}_2$ 系において単結晶試料作製に成功し、 $x = 0.25$ において鋭い価数転移を示す試料が得られた。次年度はより広範囲の Co 組成の単結晶試料を作

製して、価数転移と基底状態の相関を調べていく。

Yb 系価数秩序物質の中性子回折および Ca 置換効果 (光田暁弘、横枕拓八)

価数秩序を示す YbPd に注目して研究を行っている。価数秩序状態において Yb³⁺ 層と Yb^{2.6+} 層が交互に積層しているが、この際、2.6 価という非整数価数をとる物質は非常に珍しい。これが原因となって、価数秩序にもかかわらず伝導電子が供給され、伝導電子による局在モーメントの遮蔽 (近藤効果) が誘起されることが明らかになっている。本年度は Yb を Ca²⁺ で一部置換することによる価数秩序への影響を磁化、電気抵抗測定から調べた。その結果、価数秩序温度は低温へシフトし、最終的には抑制されることが分かった。また、YbPd は $T = 1.9$ K 以下で非整合なサイン波磁気構造を示すことが明らかになっているが、より低い温度で整合磁気構造に転移することが予想されている。このことを調べるために原子力研究開発機構の JRR-3 で単結晶中性子回折実験を行った。 $T = 0.5$ K 以下で整合磁気伝播ベクトルが新たに観測されたが、 $T = 1.9$ K まで観測された。すなわち、整合と非整合伝播ベクトルが共存していることになり磁気構造を説明が出来ていない。次年度は、これらの点を明らかにするため希釈冷凍機を用いてより低温領域を調べることを計画している。また、YbPd は価数揺動によって熱電能が増強されることが知られており、熱電材料としての可能性を秘めている。次年度はこの観点から共同研究をスタートする。

スピントロニクス現象の圧力効果 (光田暁弘、木村哲平)

スピントロニクス分野に圧力効果の研究手法を導入することを目指して固体電子物性研究室と共同で研究を行っている。これまで、強磁性 (FM)/重金属 (HM) 界面において強磁性共鳴によるスピン注入を利用して、圧力によって界面のスピン注入効率が増強されることを明らかにしてきた。FM/HM 界面では通常の巨大磁気抵抗 (GMR) 効果に加えて、スピホール効果 (SHE) に起因する一方向性の磁気抵抗効果 (UMR) が重畳して観測されるため、スピホール効果を評価するためにはこれらを分離する必要がある。我々はホイートストンブリッジ形状に Pt/NiFe を成膜した素子を用いることで、UMR を抽出することに成功し、圧力効果を調べることができた。次年度はその起源について調べて行く。

発表論文

《 原著論文 》

Electronic density of state in valence fluctuating Kondo lattice systems studied by point-contact spectroscopy:

Shiga Masanobu, Maruyama Isao, Mitsuda Akihiro, Wada Hirofumi, Kawae Tatsuya
Low Temp. Phys. vol. **49** (2023) 876-885.

Observation of Hybridization Gap in Heavy Fermion System $\text{EuNi}_2(\text{P}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$ via Point-Contact Spectroscopy:

Shiga Masanobu, Takahashi Takuya, Teramoto Tsubasa, Maruyama Isao, Mitsuda Akihiro, Wada Hirofumi, Kawae Tatsuya
JPS Conf. Proc. vol. **38** (2023) 011098-1-6.

《 その他の論文 》

著書

講演

《 海外での講演 》

Experimental and Theoretical Evaluation for Pressure Effects on Spin Hall Effect in Pt:

Riku Iimori, Sora Obinata, Taishiro Yamazaki, Akihiro Mitsuda, Takashi Kimura,
Intermag 2023 Conference

《 国内での講演 》

Eu 化合物の単結晶育成と物性評価:

光田暁弘

科研費 基盤研究 (B) 「希土類化合物が示す価数揺動・転移機構の共鳴 X 線分光複合計測とベイズ推定による解明」 2023 年度 報告会

外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》

科学研究費補助金、基盤研究 (C)

ユーロピウム化合物における新奇基底状態と価数不安定現象の相関の解明

研究代表者：光田暁弘

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

他大学での研究と教育

学部 4 年生卒業研究

大谷峻人：(指導教員、光田暁弘)： SrCo_2P_2 における P-P 結合非結合転移に対する一軸圧力効果

松田悠太：(指導教員、光田暁弘)：価数秩序物質 YbPd に対する一軸圧力による塑性変形効果

修士論文

中島怜：(指導教員、光田暁弘)： EuNi_2P_2 の価数揺動に対する元素置換及び圧力効果

横枕拓八：(指導教員、光田暁弘)： YbPd の金属的価数秩序に対する Ca 置換効果

博士論文

外国人留学生の受け入れ

学外での学会活動

受託研究・民間との共同研究

その他の活動と成果

光田暁弘：九州大学低温センター運営委員

光田暁弘：九州大学超伝導システム科学研究センター運営委員

光物性

研究室構成員

中村祥子 准教授
《 学部 卒業研究生 》
魚返 啓太 寺尾 萌子

担当授業

力学概論 (中村祥子)、物理学総合実験 (中村祥子)

研究・教育目標と成果

鉄系超伝導体薄膜における磁束量子の研究 (中村祥子)

磁束量子の運動を考えると、磁束量子の質量は極めて小さいので、加速度項 $m\ddot{x}$ は無視できて、粘性項 $-\eta\dot{x}$ とピン止め項 $-kx$ だけに関わるとして、直流～マイクロ波までのダイナミクスが説明されてきた。しかし、テラヘルツ帯の高い周波数で駆動すると、周波数の2乗で大きくなる加速度項の影響が無視できなくなり、磁束量子の運動方程式は、散逸がある非調和振動子の強制振動の方程式となる。本年度は、前職で鉄系超伝導体の磁束量子に対して行った遮蔽電流存在下のテラヘルツ第2高調波 (SHG) 測定の結果を解析し、超高速で運動する磁束量子は、静止状態でトラップしていた準粒子を置き去りにして運動することを明らかにした。

サブテラヘルツ波パルス光源の開発 (中村祥子、寺尾萌子、魚返啓太)

物性研究のためのサブテラヘルツ波パルス光源の開発に向けて、テラヘルツ時間領域分光系と微細加工の環境を整備した。テラヘルツ分光については、フェムト秒再生増幅器を励起光とし、GaP 結晶をテラヘルツ波の発生・検出に用いた分光系を立ち上げた。微細加工については、マスクレス露光装置を中心としたフォトリソグラフィの環境を新規に導入し、ガリウムヒ素基板に対して条件出しを行った。また、励起光の成形に使用するフォトマスクについても、加工方法・条件の検討を行った。

テラヘルツバンドパスフィルタの開発 (中村祥子)

テラヘルツ高調波発生の研究には、高強度・狭帯域のテラヘルツ波パルスが必要であ

る。通常、高強度・広帯域のテラヘルツ波パルスバンドパスフィルタによって狭帯域化することで生成するが、既製品のメタルメッシュフィルタを用いると、バンド幅が狭すぎてパルス幅が伸び、薄膜試料の研究に適さないことがある。近年、高抵抗シリコンウエハに微細加工を施すことで、バンド幅を広範囲で制御できるバンドパスフィルタが提案された。そこで、構造をシミュレーション計算で設計し、ARIMの共用装置を用いて実際に作製した後、テラヘルツ透過を測定して、シミュレーションと実測データの一致を確認した。

ペロブスカイト薄膜における空間反転対称性の破れの研究 (中村祥子、魚返啓太)

元素置換 SrTiO_3 は、空間反転対称性の破れが超伝導性を増強している可能性が取りざたされている物質である。その薄膜について、近赤外第2高調波発生 (SHG) を用いて空間反転対称性の破れを研究するために、SHG光を取り出すためのダイクロイックミラーおよび試料を強誘電転移温度以下まで冷却するための液体ヘリウムフロークライオスタットのテスト、SHG光を検出するためのCMOSカメラのデータ収集プログラムの開発を行った。

発表論文

《 原著論文 》

Picosecond Trajectory of Two-dimensional Vortex Motion in $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ Visualized by Terahertz Second Harmonic Generation: Sachiko Nakamura, Haruki Matsumoto, Hiroki Ogawa, Tomoki Kobayashi, Fuyuki Nabeshima, Atsutaka Maeda, Ryo Shimano, arXiv:2401.07397v1 (accepted for publication in Phys. Rev. Lett.)

《 その他の論文 》

著書

講演

《 海外での講演 》

Superconducting pairing symmetry of FeSe studied by terahertz third-harmonic generation

H. Matsumoto, S. Nakamura, H. Ogawa, T. Kobayashi, F. Nabeshima, A. Maeda, R.

Shimano

International Conference on Low-Energy Electrodynamics in Solids (LEES) 2023, Jun. 29, 2023, Sankt Pölten, Austria

《 国内での講演 》

テラヘルツ第三高調波発生を用いた鉄系超伝導体 FeSe の低エネルギー集団励起モードの観測

松本陽行, 中村祥子, 小川浩生, 小林友輝, 鍋島冬樹, 前田京剛, 島野亮

名古屋大学研究会「強相関電子系のフロンティア」, 2023年8月21日 (名古屋大学)

Observation of a low energy collective mode in FeSe by terahertz third-harmonic generation

松本陽行, 中村祥子, 小川浩生, 小林友輝, 色摩直樹, 鍋島冬樹, 前田京剛, 島野亮

MPI-UBC-UTokyo Workshop 2023, 2023年12月12日 (東京大学)

テラヘルツ第3高調波発生による鉄系超伝導体 FeSe の低エネルギー集団励起モードの観測

松本陽行, 中村祥子, 小川浩生, 小林友輝, 鍋島冬樹, 前田京剛, 島野亮

日本物理学会 2024年春季大会, 2024年3月20日 (オンライン)

外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

JST さきがけ、革新光：革新的光科学技術を駆使した最先端科学の創出
高強度サブテラヘルツ波パルスで操る超伝導ナノ磁気構造ダイナミクス
研究代表者：中村祥子

令和5(2023)年度理学研究院若手支援令和1号資金支援、A型

近赤外第2高調波発生で探る元素置換 SrTiO₃ 薄膜における空間反転対称性の破れ
研究代表者：中村祥子

文部科学省マテリアル先端リサーチインフラ（ARIM） 令和5年度 試行的利用制度
LT-InGaAs 基板を用いた光伝導スイッチの研究
研究代表者：中村祥子

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

他大学での研究と教育

学部4年生卒業研究

修士論文

博士論文

外国人留学生の受け入れ

学外での学会活動

受託研究・民間との共同研究

その他の活動と成果

固体電子物性

研究室構成員

木村崇 教授

山田和正 助教

荒井毅 准助教

《 博士研究員 》

Shaojie Hu Dion Troy

《 大学院 博士課程 》

鄭 剛 (Zheng Gang) 岩堀拓真 大日方初良 一兜 博人

飯森 陸

《 大学院 修士課程 》

宮崎圭司 山崎 太志郎 榊本 浩克 小安 凱人

劉 松儒 周 辰皓 劉 書含 梶間 廉

小谷 悠太 田中 智也 入倉 大輔 神本 晋作

坪口 椎那

《 学部 卒業研究生 》

太田 正洋 大島 怜 宇野 一真 澤田 祐衣

担当授業

自然科学総合実験(山田和正、木村崇)、物理学総合実験(山田和正)、物理学入門IA(木村崇)、物理学入門IB(木村崇)、物理数学IA(木村崇)、物理数学IB(木村崇)、物性物理学III(木村崇)

研究・教育目標と成果

動的スピン注入法を応用した軌道角運動量流の生成と検出 (大日方初良、木村 崇)
軌道角運動量の流れは軌道流と呼ばれており、スピン流より高い生成効率および長距離伝搬特性から注目されている。本年度は C_r の有するスピン軌道相互作用を介して動的に生成されたスピン流を軌道流に変換、検出する手法の開発に成功した。さらに、これを応用することで軌道流の伝搬特性の評価を行い、その長距離伝搬を確認すること

にも成功した。

超伝導 Al 細線におけるスピン偏極準粒子の緩和過程 (岩堀拓真、木村 崇)

本研究では、微細加工技術により作成した常伝導体/超伝導体/強磁性体 複合素子を持ちいて、現状未解明である超伝導体におけるスピン偏極準粒子の緩和機構を実験的に明らかにすることを目的とする。超伝導状態において長いスピン拡散長を持つ Al で細線を作成し、観測される非局所抵抗の距離的な減衰を測定することでスピンごとの準粒子緩和長を評価比較した。

ファンデルワールス強磁性体/強誘電体系における磁気特性の電界変調 (小谷 悠太、飯森 陸、木村 崇)

近年、室温で高い垂直磁気異方性を有するファンデルワールス強磁性体 Fe_3GaTe_2 が報告され注目を集めている。ファンデルワールス強磁性体は、層間距離や面内歪に対して磁気相互作用が敏感に変化する特徴がある。そこで、今回我々は強誘電性基板である PMN-PT 基板上に Fe_3GaTe_2 を用いたホール測定デバイスを作製し、さらなる強磁性相互作用の増強や磁気異方性の電界変調を狙った本研究を行った。さらに、第一原理計算等も援用し電界効果の機構解明を試みた。

スピントロニクスデバイスに対する圧力効果 (飯森 陸、山崎 太志郎、木村 崇)

異種物質界面におけるスピン軌道相互作用に起因した電流とスピン流の相互変換現象は高効率な磁化反転などへの応用が期待されている一方で、界面の原子間距離に極めて敏感であり、圧力印加により大きな変化を誘引できる可能性がある。そこで、高圧力技術をスピン流-電流変換現象に適用することで、変換効率の飛躍的向上のための設計指針の確立を目指し研究を行った。さらに、第一原理計算等も援用し界面系の電子スピン状態に対する圧力効果の機構解明を試みた。

準安定相重金属を用いたラシュバ型スピン軌道相互作用に関する研究 (山崎太志郎、飯森陸、木村崇)

重金属 Ta, W には A15 結晶構造に属し、準安定構造である β 相が存在する。この相では最安定相と比べスピン軌道相互作用 (SOI) に由来するスピンホール効果がより大きく発現されることが知られている。しかし、界面で現れるラシュバ型 SOI に依存するラシュバ効果については、相で比較した報告例が少ない。そこで、Ta または W と各種非磁性金属による界面で発現するラシュバ効果の大きさを、第一原理計算によって評価し、相による比較を行った。加えて、ラシュバ効果の大きさの違いと、仕事関数に着目し、ラシュバ型 SOI に対する仕事関数依存性の評価を試みた。

有機スピンゼーベック (山田和正)

有機物中のスピン流は近年注目されている。温度差を利用して有機物中の熱スピン流の生成を試みている。CoFeAlをスピン流生成層、アモルファファスカーボンをスピン流通過層、Ptをスピン流検出層とする膜を成膜し、Pt層の電圧発生を確認済みである。発生した電圧を強磁性層のネルンスト効果の寄与と分離するため、横型構造の作製を試みている。

反転非対称性・準周期性のフォノンによる熱伝導 (荒井毅)

反転非対称性・準周期性等既存の結晶での研究の難しい系の特徴を低温でのフォノンによる熱伝導という長波長近似等を用いて特徴を明らかにしやすい系で探る。光や電子系に比べ注目されていないフォノン系を狙う。熱制御は応用上エネルギー問題・環境問題にも重要である。

室温スパッタリング法で堆積させたYBCO薄膜の膜質評価 (澤田 祐衣、木村 崇)

超伝導体の内、一般的なs波超伝導体ではスピン流関連等の先行研究が進んでいるが、YBCOを始めとするd波超伝導体など酸化物超伝導体では微細加工の難しさから研究が困難であった。しかし、d波超伝導体はスピン流等の強磁性秩序との相性が良いとされており、これらを使用した実験は期待されている。そこで本研究では、微細加工に応用することを目的として、従来高温で行われるプロセスを常温での実現を目指して実験を行なった。一連の実験で得られた結果は室温で薄膜作成の可能性を示した。

発表論文

《 原著論文 》

Efficient Thermo-Spin Conversion in van der Waals Ferromagnet FeGaTe:

Shuhan Liu, Shaojie Hu, Xiaomin Cui, and Takashi Kimura,

Adv. Mater. **36** (2024) pp. 2309776

Resistivity Measurements in Palladium-Hydride Film Prepared by Low-Temperature Hydrogen Absorption Method:

R. Kato, T. Yoshida, R. Iimori, Tai Zizhou, M. Shiga, Y. Inagaki, T. Kimura, and T. Kawae,

J. Phys. Soc. Jpn. **93** (2024) pp. 024703

Synergistic Effect of Nano Strontium Titanate Coating and Ultraviolet C Photofunctionalization on Osteogenic Performance and Soft Tissue Sealing of poly(ether-ether-ketone):

T.Chen, Y.Jinnno, I.Atсутa, A.Tsuchiya, S.Obinata, R.Iimori, T.Kimura, Y.Ayukawa, ACS Biomater. Sci. Eng. **10** (2024) pp.825-837

Field and temperature-controlled positive and negative exchange biases in CoO/YIG bilayers on GGG(111):

Po Chun Chang, Shi Yu Liu, Hung Lin Lin, Shaojie Hu, Takashi Kimura, Fang Yuh Lo, and Wen Chin Lin,

J. Alloys Compd. **968** (2023) pp. 172081

Experimental and Theoretical Evaluation for Pressure Effects on Spin Hall Effect in Pt:

R. Iimori, S. Obinata, T.Yamazaki, A. Mitsuda, and T. Kimura, IEEE Trans. Magn. **59** (2023) pp. 1400305

Magneto-Electric Voltage Due to Microwave Heating in CoFeB/Heavy Metal Bilayer System:

S. Obinata, R.Iimori, T.Tanaka, R.Kajima, and T. Kimura, IEEE Trans. Magn. **59** (2023) pp. 4100704

Efficient Electrical Manipulation of the Magnetization Process in an Epitaxially Controlled Co₂FeSi/BaTiO₃ Multiferroic Interface:

Shaojie Hu, Shinya Yamada, Po Chun Chang, Wen Chin Lin, Kohei Hamaya, and Takashi Kimura,

Phys. Rev. Appl. **20** (2023) pp. 034029

《Proceedings》

《その他の論文》

著書

講演

《 海外での講演 》

Large scale fabrication of $\text{Tm}_3\text{F}_5\text{O}_{12}$ film with perpendicular magnetic anisotropy using magnetron sputtering

M.N.Agustrisno, Sora Obinata, Takamasa Okumura, Kunihiro Kamataki, Itagaki Naho, Kazunori Koga, Masaharu Shiratani, Naoto Yamashita, ISPlasma2024, Nagoya Univ., JAPAN (March 2024)

Electrical modulation of interfacial spin-charge conversion in CoFeB/Pt bilayer on PMN-PT substrate

H. Hitotsukabuto*, R. Iimori, S. Obinata, K. Yamada and T. Kimura, The 7th International Symposium on Frontiers in Materials Science FMS2024, NYCU, Hsinchu, Taiwan (January 2024)

Pressure effect on unidirectional magnetoresistance in heavy metal/ferromagnetic bilayer:

Riku Iimori*, Teppei Kimura, Taishiro Yamazaki, Kazmasa Yamada, Akihiro Mitsuda and Takashi Kimura, The 7th International Symposium on Frontiers in Materials Science FMS2024, NYCU, Hsinchu, Taiwan (January 2024)

Geometrical effect in spin-torque ferromagnetic resonance measurement:

S. Obinata, Y. Kota, R. Iimori, R. Kajima, T. Tanaka, T. Kimura, MRM2023, Kyoto, JAPAN (December 2023)

Pressure Modulation of Inverse Rashba-Edelstein Effect in Ag/Bi Interface:

R. Iimori, S. Obinata, T. Yamazaki, A. Mitsuda, and T. Kimura, MRM2023, Kyoto, JAPAN (December 2023)

Experimental and Theoretical Evaluation for Pressure Effects on Spin Hall Effect in Pt:

R. Iimori, S. Obinata, T. Yamazaki, and T. Kimura,
Intermag 2023, Sendai, JAPAN (May 2023)

Magneto-electric signal due to microwave heating in ferromagnetic/nonmagnetic bilayer system:

S. Obinata, R. Iimori, T. Tanaka, R. Kajima, and T. Kimura,
Intermag 2023, Sendai, JAPAN (May 2023)

Reconfigurable Spin-wave Dispersion in Continuous Magnetic Layer Induced via Artificial Spin Ice Magnonic Crystal:

Troy Dion, Hidekazu Kureyabashi, Will R. Branford, Takashi Kimura, Jack C. Gartside, Daan M. Arroo, Alexander L. Vanstone, and Kilian D. Stenning,
APS March Meeting 2023, Las Vegas, US (March 2023)

《 国内での講演 》

強誘電性圧電効果を基軸にしたスピンホール効果の電界変調:

一兜博人, 飯森陸, 大日方初良, 木村崇

第 84 回 応用物理学会秋季学術講演会, 熊本城ホール (2023 年 9 月)

パラメトリック励起スピン波による発熱現象の解析

田中智也, 梶間廉, 大日方初良, 木村崇

日本物理学会 第 78 回年次大会, 東北大学 (2023 年 9 月)

強磁性体/非磁性体二層構造における非共鳴交流電気信号の解析:

梶間廉, 田中智也, 大日方初良, 木村崇

日本物理学会 第 78 回年次大会, 東北大学 (2023 年 9 月)

弱反局在効果による Bi/Ag ラッシュバ界面のスピン緩和機構評価:

神本晋作, 飯森陸, 岩堀拓真, 大日方初良, 宇野一真, 木村崇

日本物理学会 第 78 回年次大会, 東北大学 (2023 年 9 月)

非磁性金属/ β -Ta 界面におけるスピン輸送特性の理論的評価:

山崎太志郎, 飯森陸, 木村崇

日本物理学会 第 78 回年次大会, 東北大学 (2023 年 9 月)

超伝導/常伝導体界面によるスピン流制御:

大西紘平

第70回 応用物理学会 春季学術講演会, 上智大学 (2023年3月)

外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》

文部科学省科学研究費補助金、基盤研究 (S)

回転スピン流による再構成可能な超伝導量子デバイスの創成

研究代表者：木村崇

文部科学省科学研究費補助金、挑戦的研究 (開拓)

ナノスピンドYNAMICSを基軸とした革新的流体制御技術の開拓

研究代表者：木村崇

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

水素化により制御されたスピンネットワークを利用した万能なニューロモルフィックシステム

SICORP 戦略的国際研究プログラム

木村 崇

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

Troy Dion、文部科学省科学研究費補助金、特別研究員奨励費 マグノニック計算を目標とした YIG/ナノ磁性体複合構造におけるスピンドYNAMICS

他大学での研究と教育

学部4年生卒業研究

宇野一真 (指導教員、木村崇) 表面をミリング処理した超伝導 Al 細線の準粒子緩

和長測定

- 太田正洋 (指導教員、木村崇) 強磁性ナノ細線を用いた熱ホール効果の観測
大島怜 (指導教員、木村崇) Pb ナノ細線を用いた Little parks 振動の観測
澤田祐衣 (指導教員、木村崇) 室温スパッタ法で堆積させた YBCO 薄膜の膜質評価と改善

修士論文

- 宮崎圭司 (指導教員、木村崇) 磁気抵抗効果を用いた人工スピンアイスの静的・動的磁気特性の評価
榎本浩克 (指導教員、木村崇) CoFeB / Cr 構造における動的スピン注入と軌道角運動量流の検出に関する研究
山崎太志郎 (指導教員、木村崇) 準安定相重金属を用いた界面ラッシュバスピ軌道相互作用に関する研究
小安凱人 (指導教員、木村崇) 遷移金属ナノワイヤにおける磁気熱電効果に関する研究
劉松儒 (指導教員、木村崇) 2D ファンデルワース材料 Fe_3GaTe_2 におけるラマンスペクトル研究

博士論文

外国人留学生の受け入れ

劉松儒、鄭剛

学外での学会活動

受託研究・民間との共同研究

その他の活動と成果

複雑物性基礎

研究室構成員

木村 康之 教授
稲垣 紫緒 准教授
小林 史明 助教
《 博士研究員 》

《 大学院 博士課程 》

齊藤 圭太

《 大学院 修士課程 》

宮崎 陸 岩崎 暖人 井出 健一郎 津田 健吾
河野 快 橋本 明伸 松田 朝之 村上 亮太
河野 龍之介 湯浅 康雄

《 学部 卒業研究生 》

貞松 知里 葛城 祐太 海田 萌々子 大谷 僚平
河野 太一

《 研究生 》

イ・ジウォン (交換留学)

《 訪問研究者 》

担当授業

物理学の進展 B(木村康之)、振動と波動 A(木村康之)、振動と波動 B(木村康之)、電磁気学基礎 (木村康之)、熱力学基礎 (木村康之)、複雑系物理学 (木村康之)、物理学総合実験 (小林史明)、データマイニングと情報可視化 (稲垣紫緒)

研究・教育目標と成果

《今年度の目標》

- モデル自己駆動粒子系や外場駆動粒子系の実現とその挙動の解明を目指す。(1, 2, 3)
- 自己駆動粒子が分散した複合溶液を用いて、電場で粘性の制御が可能なメカノメタマテリアルの創生を目指す。(4)
- 円偏光を照射することでミクロンサイズの液晶液滴の自転を誘起し、それらの流体相互作用を明らかにすることを旨とする。(5)
- 電解質溶液の界面物性と電気物性を解明することを旨とした。(6, 7, 8)
- 粉粒体の安息角が底面の粗さや山のサイズにどのように依存して変わるかを調べる実験的研究。(9)
- ろうそくの炎の振動に関する実験的研究。(10)
- 2種類のサイズの粉粒体の混合プロセスを実験的に調べる研究。(11)
- 光弾性体円盤を用いて、粉体内部の応力分布について調べる研究。(12)
- 単層二分散粉体系における輸送現象に関する実験的研究。(13)
- 粉体時計に関する実験的研究。(14)

- (1) **界面活性剤水溶液中での自己駆動液晶液滴の運動解明** (津田、木村)
界面活性剤水溶液中を自己駆動する液晶滴系を実現し、そのサイズによる運動モードの変化を明らかにした。コレステリック液晶液滴においては、そのキラリティーに対応して、2つのらせん運動を示すことが明らかとなった。
- (2) **高分子溶液中での電場駆動ヤヌス粒子の運動モード転移** (齋藤、河野、貞松、小林、木村)
絡み合い高分子系に分散した電場駆動粒子の運動を観察し、ある閾値速度を超えると粒子の運動が直線運動(アクティブブラウン運動)から回転運動に変化することを実験的に明らかにした。さらに、粘弾性モデルを用いて定性的にその転移を説明することに成功した。
- (3) **運動性の異なるアクティブ粒子系での相分離挙動** (橋本、貞松、齋藤、小林、木村)
運動性の異なるアクティブ粒子を混合した系での構造形成を実験的に調べた。その結果、単一のアクティブ粒子系では、運動性誘起相分離により、クラスター形成が起こること、運動性が異なる粒子混合系では、運動性による相分離が起こる可能性があることを見出した。

- (4) **自己駆動粒子の集団運動とそのレオロジー挙動の解明** (井出、河野、湯浅、小林、木村)
クインケ粒子系を用いて電場によりその構造制御を行い、溶液の粘度を広い範囲で制御することに成功した。ことに、高濃度の挙動は、電気粘性効果と粒子回転による自発流動を取り入れたモデルにより、定性的に説明できることがわかった。
- (5) **光駆動自転粒子系で創成とその最適化** (齋藤、木村)
円偏光レーザービームを用いて、捕捉したミクロンサイズの液晶液滴に回転運動を誘起し、その回転速度の粒子サイズ依存性を測定した。さらに、得られた依存性を波長板効果と散乱効果を加味した理論式を用いて、サイズによる両者の寄与を議論することに成功した。さらに、複数粒子を用いて複雑な流動場を設計し、PIVを用いてその流れ場の測定し、評価を行った。
- (6) **水と有機溶媒の混合系における電気二重層の研究** (岩崎、木村、植松)
水とアルコールの混合系において、電気化学実験系を構築し、電気二重層の静電容量を測定した。電極付近で、バルクとは異なる組成比になっていることを示唆する実験結果が得られた。
- (7) **気泡分散系の動力学に関する実験的研究** (井上、宮崎、木村、植松)
マイクロスケールの気泡分散系の顕微鏡観察をすることで、気泡分散系が従うオストワルト熟成の動力学を発見し、そのメカニズムを検討した。また、マイクロバブルがナノバブルに遷移していく過程を観察できるようになった。さらに、ナノバブルを暗視野顕微鏡で観測する系を構築し、ナノバブルの濃縮・希釈に対する安定性を検討した。
- (8) **高分子逆浸透膜のイオン伝導の実験的研究** (井出、木村、植松)
ナノスケールの拘束を実現できる高分子逆浸透膜を使って、イオンの輸送物性の計測実験に取り組み、ナノスケール特有の電気伝導コンダクタンスの塩濃度依存性を観測することができた。
- (9) **粉粒体の安息角に関する実験的研究** (葛城、稲垣、木村)
粉粒体を平面に注ぐと、ある一定の角度を保って斜面を形成する。その角度を安息角というが、一般にはそれぞれの粒子の物性値の一つとして知られている。我々の実験で、この安息角が山のサイズや、底面の床のざらつき具合によって変わることが分かった。先行研究においては、安息角の山のサイズ依存性は詳しく調べられておらず、床の影響がどの程度山が大きくなっても残るのか、今後系統的にパラメータを振って実験を行う。

- (10) **ろうそくの炎の振動現象** (大谷、稲垣、木村)
兵庫教育大の猪本先生のと共同研究で、ろうそくを円筒容器で囲ったときに観察される炎の振動現象について、実験を行った。特に、円筒容器の上部に小さな穴をあけて空気の流れを制限したときに、これまで観察されたことのないゆっくりとした炎を振動が観察された。容器の上下に配置した穴の大きさを系統的に変えることで、振動する条件について実験的に調べた。
- (11) **粉体の浸透現象** (松田、稲垣、木村)
大きさの異なる二種類の大きさの粒子を網で仕切り、鉛直方向に加振したとき、小粒子が網を通過して大粒子の中に浸透していく現象を実験的に調べた。セルオートマトンによるモデル化を行い、実験で観察された混合プロセスを再現する拡散プロセスについて調べた。
- (12) **光弾性体円盤の巨視的物性** (村上、稲垣、木村)
光弾性体で円盤を作成し、多数の円盤を並べた状態で力を加えて、円盤媒質内部にどのように力が伝わるかについて実験的な研究を行った。偏光板で挟んだ状態で光弾性体円盤に力を加えたとき、円盤内部に現れるパターンの解析を行った。2分散多粒子系についても実験を行い、媒質にかかる力と検出される画像の輝度の関係について調べた。
- (13) **速度揺らぎに駆動される粉体の輸送現象** (海田、稲垣、木村)
高分子とコロイドの混合溶媒において、温度勾配と濃度勾配のバランスでコロイド粒子の輸送方向が変わる現象をソーレ効果という。マクロな粉体系で同様の局在が切り替わる現象が確認できるかどうか調べるために、底面に反発係数の異なる基盤をタイル状に張り合わせた容器に、二分散の粉体を単層に配置して鉛直加振したとき、大きいほうの粒子が局在する場所が充填率に依存して切り替わる現象について実験を行った。反発係数の異なる基盤を用いることで、場所によって異なる速度揺らぎを実現することに成功し、大粒子の局在が加振強度や充填率によって変わることが観察された。今後はこの現象のメカニズムを解明するために、粒子の大きさや比重、基盤の材質を変えるなどしてさらに実験を進める。
- (14) **粉体時計に関する実験的研究** (河野快、稲垣、木村)
サイズの異なる粒子を仕切りのあるセルに入れて加振すると、粒子が分離して、その空間分布が時間的に振動することが知られており、粉体時計と呼ばれる。我々は、セルの数を変えたり、二重円筒を用いた周期境界条件にするなどして、粒子の局在分布の時間的・空間的变化を調べる実験を行った。セル

が7つの場合まで、新たにクラスターの振動現象を実験的に見出した。粒子の排出速度を測定し、実験測定に基づいたフラックスモデルを構築し、実験結果を定性的に再現することに成功した。

《 来年度の目標 》

研究（1 - 14）のさらなる発展、及び教育の充実。

発表論文

《 原著論文 》

1. Haruto Iwasaki, Yasuyuki Kimura, and Yuki Uematsu, "Ubiquitous preferential water adsorption to electrodes in water/1-propanol mixtures detected by electrochemical impedance spectroscopy", *Journal of Physical Chemistry C* **127**, 23382 (2023).
2. Kurumi Kondo, Hiroyuki Ebata, and Shio Inagaki, "Segregation patterns in rotating cylinders determined by the size difference, density ratio, and cylinder diameter", *Scientific Reports* **13**, 13495 (2023).
3. Shoichi Yoneta, Hiroyuki Ebata, and Shio Inagaki, "Convection of monodisperse particles in a highly filled rotating cylinder", *Physical Review E* **109**, L022901 (2024).
4. Hiroyuki Ebata and Shio Inagaki, "Self-replicating segregation patterns in horizontally vibrated binary mixture of granules", *Scientific Reports* **14**, 5329 (2024).
5. Keita Saito and Yasuyuki Kimura, "Slip of a liquid crystal droplet rotator in viscous fluids", *Soft Matter* **20**, 3066 (2024).

《 その他の論文 》

著書

講演

《海外での講演》

《国内での講演》

2023.07.15 西日本非線形研究会 2023 (KDD 維新ホール)

1. ”高分子溶液中のアクティブコロイドの運動”, 貞松 知里, 木村 康之 (口頭)
2. ”アクティブコロイドの集団運動”, 河野 太一, 木村 康之 (口頭)

物理学会第 78 回年次大会 2023.09.16-19(東北大)

3. ”5 コンパートメントでの粉体時計”, 河野快, 稲垣紫緒 (口頭)
4. ”電場駆動ヤヌス粒子の集団運動”, 橋本明伸, 齊藤圭太, 小林史明, 岩下靖孝, 木村康之 (口頭)
5. ”サイズとキラリティが同時変化する液晶液滴の運動”, 津田健吾, 木村康之 (口頭)
6. ”高分子水溶液中でのアクティブコロイドの運動”, 河野龍之介, 齊藤圭太, 小林史明, 岩下靖孝, 木村康之 (口頭)

2023.12.2 第 129 回日本物理学会九州支部例会 (長崎大学)

7. ”電場駆動ヤヌス粒子の集団運動” 貞松知里, 橋本明伸, 齊藤圭太, 小林史明, 木村康之 (口頭)
8. ”交流電場駆動クインケ粒子の集団運動” 湯浅康雄, 井出健一郎, 小林史明, 木村康之 (口頭)
9. ”直流電場駆動クインケ粒子の構造形成” 河野太一, 井出健一郎, 小林史明, 木村康之 (口頭)

2024.03.18-21 日本物理学会春季大会 (オンライン)

10. ”電場駆動ヤヌス粒子の構造形成”, 貞松知里, 橋本明伸, 齊藤圭太, 小林史明, 岩下靖孝, 木村康之 (口頭)
11. ”クインケ粒子の構造形成とレオロジー”, 河野太一, 井出健一郎, 小林史明, 木村康之 (口頭)
12. ”Granular penetration phenomena” Tomoyuki Matsuda and Shio Inagaki, Statphys28, 2023.08.07, Tokyo.(ポスター)
13. ”Granular convection in a coaxial rotating cylinder” Shoichi Yoneta and Shio Inagaki, Statphys28, 2023.08.08, Tokyo.(口頭)

2023.08.12-18 The 9th International Discussion Meeting on Relaxations in Complex Systems (幕張メッセ)

14. ”Colloidal systems driven by topological optical tweezers”, Keita Saito and Yasuyuki Kimura. (Invited talk)

2023.09.04-08 International Soft Matter Conference 2023 (大阪国際)

会議場)

15. "Dynamics of self-ropelled Janus particles in complex fluids", Keita Saito, Ryunosuke Kawano, Fumiaki Kobayashi, Yasutaka Iwashita, Yasuyuki Kimura.(口頭)
16. "Ostwald ripening of aqueous microbubble solutions", Sota Inoue, Yasuyuki Kimura, and Yuki Uematsu.(口頭)
17. "Segregation patterns in rotating cylinders determined by the size difference, density ratio, and cylinder diameter", Kurumi Kondo, Hiroyuki Ebata, and Shio Inagaki, Core to Core 2023 Kick off meeting, ロームシアター京都.(ポスター)
18. "Electrically driven active particles in complex environments", Yasuyuki Kimura, Core to Core 2023 Kick off meeting, ロームシアター京都.(Invited)
2023.09.15 第74回コロイドおよび界面化学討論会国際シンポジウム (善光寺紫雲閣)
19. "Equilibrium and Non-equilibrium Assemblies of Spherical Colloids", Yasuyuki Kimura (Keynote Lecture)

外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》

科学研究費補助金、基盤研究 (B)

顕微イメージングを用いた非平衡ソフトマター不均一系の局所力学応答測定
研究代表者：木村康之

科学研究費補助金、基盤研究 (C)

非熱的揺らぎの空間勾配と排除体積効果に駆動されるマクロな粒子系の非平衡輸送現象

研究代表者：稲垣紫緒

科学研究費補助金、若手研究

液晶乱流構造とレオロジー特性の解明研究代表者：小林 史明

科学研究費補助金、基盤研究 (B)

電場で誘起される液晶の自発流れの成長機構の解明

研究代表者：長屋 智之 (大分大学)

研究分担者：小林 史明

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

他大学での研究と教育

木村康之：広島大学で「ソフトマター複雑系科学」と題して集中講義を行った (2023年12月12日、13日)。

学部4年生卒業研究

河野太一 (指導教員、木村康之) クインケ回転粒子分散系のレオロジー測定

貞松知里 (指導教員、木村康之) 電場駆動ヤヌス粒子の集団運動

大谷僚平 (指導教員、稲垣紫緒) 火炎の振動現象における気流の影響

葛城祐太 (指導教員、稲垣紫緒) 擬二次元砂山安息角に対する内部支柱構造の影響

海田萌々子 (指導教員、稲垣紫緒) エネルギー散逸と充填率に依存した粒子の局在パターン

修士論文

宮崎 陸：(指導教員、木村康之)：濃縮ナノバブル水の質量測定法の確立

岩崎 暖人：(指導教員、木村康之)：二重層容量測定による水/1-プロパノール混合系における電極への水分子吸着の解明

井出 健一郎：(指導教員、木村康之)：荷電性複雑系の電気・力学物性の研究

津田 健吾：(指導教員、木村康之)：界面活性剤水溶液中を自走するコレステリック液晶液滴の運動

橋本 明伸：(指導教員、木村康之)：金属誘電体ヤヌス粒子の電場応答とその集団運動

河野 快：(指導教員、稲垣紫緒)：流体力学的に結合したコロイド粒子系の同期現象

博士論文

齋藤 圭太：(指導教員、木村康之)：Rotational motion of externally driven anisotropic particle in complex fluids (複雑流体中における外部駆動異方性粒子の回転運動)

外国人留学生の受け入れ

学外での学会活動

散乱研究会運営委員（木村）
ソフトマター研究会運営委員（木村）
Optics of Liquid Crystal 21 運営委員（木村）
日本物理学会若手奨励賞領域 12 審査委員長（木村）
日本液晶学会物理物性フォーラム委員（木村）

受託研究・民間との共同研究

その他の活動と成果

齋藤 圭太：The OMC Best Student Award: Slipping liquid crystal rotator in viscous fluid
齋藤 圭太：Best oral presentation by a young researcher funded by MDPI polymers: Self-propelled motion of electrically driven Janus particles in complex fluids
井出 健一郎：第 74 回コロイドおよび界面化学討論会 ポスター賞: 電場駆動アクティブ粒子分散系の粘性測定
齋藤 圭太：第 74 回コロイドおよび界面化学討論会 若手口頭講演賞: 複雑流体中における電場駆動ヤヌス粒子の自走運動

複雑流体

研究室構成員

前多 裕介 准教授

《 博士研究員 》

福山 達也 高畠 芙弥

《 大学院 博士課程 》

加藤 修三 Archit Negi

《 大学院 修士課程 》

家永 竜 柏原 智香 松浦 海人 鍋島 馨

担当授業

生物物理学（前多）、基礎物理学実験・同演習（前多）、国際科学特論1（前多）、非線形物理学（前多）

研究・教育目標と成果

1. 分子モーターが駆動する流動現象の計測（前多、Negi、柏原）

分子モータータンパク質のように自律的に力を生成する物質群が生み出す構造形成は非平衡現象の代表例であり、細胞内においては細胞骨格フィラメントと分子モータータンパク質が主要な役割を果たしている。特に、細胞内対称性の制御には自発的な力を生成する細胞骨格系が関わっているが、細部内においては複雑で多数の分子種が関わるため、細胞そのものを用いて物理的な解析を行うには難しい。我々はこの問題に対して、複雑さを軽減した再構成系による実験を行い、力生成を含むアクティブ流体の力学モデルを解析することで、背後にある対称性制御のメカニズムを明らかにした。これまでに、細胞サイズの油中液滴内にアクチン細胞骨格とミオシン分子モーターと関連因子を含む抽出液を封入することで、アクトミオシンの周期的な波動伝搬が発生すること、アクトミオシンの力の釣り合いが細胞核様体の配置を制御することを明らかにしている。本年度は、ここに微細加工技術を用いて境界形状を変形させた際に、アクトミオシンが生み出すクラスター形状の変化を解析した。その結果、境界形状の異方向性が流動を介してもなお再構成されたクラスターの形状にも転写され、非対称性が維持されることがわかった。さらに、細胞骨格系の力生成が流れを生み出すメカニズ

ムは細胞骨格の密度依存的に起こり、静止状態から流れが発生する状態への転移では速度が振動する不安定性が現れることを突き止めた。

2. アクティブマターの集団運動とその幾何的制御（前多、松浦、福山、高嶋）

自律的に動く要素（アクティブマター）が多数あつまると、運動方向の相関が長距離にわたって持続する集団運動が出現する。代表的なアクティブマターであるバクテリアは、高密度の集団において擬2次元平面内で大小さまざまな渦構造が入り乱れる乱流様の運動を示す。この懸濁液を円形境界のもとにおくと渦運動が出現し、複数の渦が接すると回転方向が揃う相や交互に入れ替わる相が出現する。しかし、相互作用する渦の回転方向の遷移に関する明確なルールは明らかにされておらず、本研究では境界形状を自在に設計する新たな手法を開発し、集団渦運動の転移に関わる幾何法則の解明を行った。バクテリア *Escherichia coli* の直進性変異体 RP4979 は代表的なアクティブマターであり、これを用いて集団運動の幾何学的な制御をおこなった。この幾何学的制約下のバクテリア集団運動を解析したところ、ペアとなる渦の回転方向が揃うパターンと逆回転を示すパターンが切り替わる転移点は、渦のサイズと渦間距離で定められる条件に従うことを見出した。この転移点に関する幾何学的ルールはバクテリア集団運動のみならず、上皮細胞の一種である MDCK 細胞においても観察された。さらに、MDCK 細胞の集団運動を Active self-propelled model と Voronoi 分割を組み合わせたモデルを用いて数値計算をすすめ、アクティブ乱流状態に現れる渦の幾何学的な性質について解析を進めている。

3. アクティブマターの位相欠陥と非平衡ダイナミクス（前多、家永）

上記2で明らかにしたアクティブマターの集団運動の幾何的ルールは配向相互作用に起因するため、分子種や細胞種によらず成立すると考えられる。一方で、その幾何的ルールの破れは注目するシステムの特徴を定量的に計測する手法ともなり、多細胞秩序形成を支配する新たな物理的原理の探索につながると考えられる。この動機のもと、筋芽細胞（C2C12細胞）を用いて、それぞれの集団運動における幾何的ルールの計測を行った。このためにまず、培養細胞集団を幾何的形状のもとで拘束する新たな細胞スタンプ法を開発した。昨年度までに、C2C12細胞では集団運動によって配向を揃えていくものの、局所的には向きが揃わない特異点（位相欠陥）が生じ、幾何的境界条件におかれた細胞集団では位相欠陥のペア形成に一定のルールが現れることを明らかにした。本年度は、円柱状の拘束条件を周期的に（三角格子などで）与えることで、 $-1/2$ 欠陥を配置する実験系を構築し、幾何学的に位相欠陥配置が制御できるか、または配置対称性が破れる幾何的条件があるかを明らかにすることを試みた。その結果、円柱サイズが格子間隔に比べて大きくなるにつれて $-1/2$ 欠陥の配置が対称的な配置となり、細胞集団の収縮力を反映して位相欠陥の配置が通常の液晶とは異なる点になることが

わかった。

発表論文

《原著論文》

1. Negi A, Beppu K, and Maeda YT

Geometry-induced dynamics of confined chiral active matter

Physical Review Research **5**, 023196 (2023)

2. Ienaga R, Beppu K, and Maeda YT

Geometric confinement guides topological defect pairings and emergent flow in nematic cell populations

Soft Matter **19**, 5016-5028 (2023)

3. Beppu K, Matsuura K, and Maeda YT

Geometric frustration and pairing order transition in confined bacterial vortices

arXiv:2312.15257, now published in Physical Review Research

《その他の論文》

4. Sakamoto R, Maeda YT

Unveiling the physics underlying symmetry breaking of the actin cytoskeleton: An artificial cell-based approach

Biophysics and Physicobiology **20**, e200032 (2023)

5. 島本勇太, 前多裕介, 斎藤慧

紡錘体のかたちづくり

生物物理 **63** 193-195 (2023)

6. 坂本遼太

狭い空間の細胞運動を司る力学的原理—人工細胞による構成的理解—

生物物理 **63** 163-164 (2023)

著書

講演

《 海外での講演 》

Archit Negi, Kazusa Beppu, Yusuke T. Maeda
Geometry-induced dynamics of confined chiral active matter
Gordon conference: Soft matter far from equilibrium

Yusuke T. Maeda
State transition of active cytoskeletons controlled through force and shape
Academia Sinica, Physics Colloquim

《 国内での講演 》

Archit Negi, Ryota Sakamoto, Yusuke T. Maeda
Effect of the confining geometry on self-organization of active cytoskeleton
日本物理学会 2024 年春季大会

家永竜, 前多裕介
筋芽細胞集団における円柱格子間の位相秩序と集団運動
日本物理学会 2024 年春季大会

柏原智香, 前多裕介
アクティブ細胞骨格系における状態転移と非平衡収縮ダイナミクス
日本物理学会 2024 年春季大会

前多 裕介
アクティブゲルの力学で探る細胞の構造・運動・変形
西日本非線形研究会

Ryo Ienaga, Kazusa Beppu, Yusuke T. Maeda
Guiding topological defects and contractile flow in confined nematic cell population
International Conference of Statistical Physics: Statphys28

Archit Negi, Kazusa Beppu, Yusuke Maeda
Geometry-induced dynamics of confined chiral active matter
International Conference of Statistical Physics: Statphys28

Tomoka Kashiwabara, Syeda Rubaiya Nasrin, Arif Md. Rashedul Kabir, Akira Kakugo,
Yusuke T. Maeda
Cargo transportation by kinesin-1 on collectively aligned microtubule
International Conference of Statistical Physics: Statphys28

Yusuke T. Maeda
Geometric rule and chiral edge flow in confined active matter
9th International Discussion Meeting on Relaxations in Complex System

Kaito Matsuura, Kazusa Beppu, Yusuke T. Maeda
Geometric frustration and pairing order transition in confined bacterial vortices
アクティブマター研究会 2024

柏原智香, 前多裕介
State transitions and non-equilibrium contractile dynamics in active cytoskeletons
第 61 回日本生物物理学会年会

外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》
幾何的制御で発現するアクティブマターの自励振動と生体組織秩序
科学研究費補助金 基盤研究 (B)
研究代表者：前多裕介

アクティブゲル物理学で解き明かす細胞骨格の動的秩序形成と力学化学クロストーク
科学研究費補助金 新学術領域研究 (研究領域提案型) 公募研究
研究代表者：前多裕介

超螺旋光によるアクティブマターのキラル渦制御とその幾何的普遍性の研究
科学研究費補助金 新学術領域研究 (研究領域提案型) 公募研究

研究代表者：前多裕介

アクティブゲルで切り拓く細胞の対称性と運動原理の非平衡力学
科学研究費補助金 挑戦的研究（萌芽）

研究代表者：前多裕介

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

幾何学を軸とするアクティブ乱流物理学の創出

科学技術振興機構 創発的研究支援事業

研究代表者：前多裕介

人工細胞再構成で切り拓く細胞内秩序形成のアクティブゲル物理学

住友財団 基礎科学研究助成

研究代表者：前多裕介

人工細胞の運動・変形・分裂を統一するアクティブゲル物理学の構築

ExCELLS 課題研究 (シーズ発掘)

研究代表者：前多裕介

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

加藤修三

細胞質の相分離とぬれの非平衡物理学

日本学術振興会特別研究員 DC1

Archit Negi

人工細胞再構成による細胞内アクティブゲルの研究：細胞動態から多細胞秩序へ

JST SPRING fellowship

他大学での研究と教育

前多裕介：龍谷大学農学部 「生物物理学」で3回の授業を行った。

学部4年生卒業研究

修士論文

家永 竜（指導教員、前多裕介）

空間制約による細胞配向秩序の幾何学的制御と非平衡ダイナミクス

柏原 智香（指導教員、前多裕介）

分子モーターが駆動する細胞骨格系の密度依存的な状態遷移

松浦 海人（指導教員、前多裕介）

固有直交分解によるバクテリア集団運動の渦ペア秩序の解析

博士論文

外国人留学生の受け入れ

Archit Negi（受入教員、前多裕介）

学外での学会活動

前多 裕介

科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業さきがけ「細胞の動的・高次構造体」領域アドバイザー

受託研究・民間との共同研究

その他の活動と成果

家永 竜

日本物理学会 学生優秀発表賞 受賞

柏原 智香

日本生物物理学会 学生優秀発表賞 受賞

複雑生命物性

研究室構成員

水野 大介 教授

江端 宏之 助教

《 大学院 修士課程 》

松岡 亮佑 吉良 和真 濱田 啓聖 杜 海洋

田尾 優樹 新垣 亮宗

《 学部 卒業研究生 》

上村 泰生 本間 奏宇 岩崎 優人

《 研究生 》

担当授業

物理学ゼミナール (水野大介)、生物物理学 (水野大介)、電磁気学・同演習 I(水野大介)、物理学総合実験 (水野大介・江端宏之)

研究・教育目標と成果

《 今年度の目標 》

- コロイド系の局所非線形力学応答の普遍的性質の解明。(2,7)
- 細胞内部環境のアクティブガラス的振る舞いを、細胞抽出液や遊走バクテリア懸濁液等のモデル系と比較しつつ解明する。(3,5,8)
- 独自のフィードバックマイクロレオロジー計測法を開発し、細胞やバクテリアの集団運動における揺らぎと力学応答の非平衡関係を解明する。(4)
- 非平衡ゲルや遊走微生物懸濁液等の非平衡系の揺らぎの Levy 動力学と統計分布形状の特性を明らかにする。(5)
- 非平衡ソフトマターにおける揺動散逸定理の破れを観測し、非平衡散逸や構造緩和を生み出す実効温度が系の非平衡挙動を決定する機構を調べる。(3,2)
- 細胞を始めとする光学的に不均質な媒質中において、光捕捉による力の印加とレーザー干渉法に基づく粒子追跡を高い時空間分解能で精密に行うための

技術を開発する。(1)

- 数値計算を用いてアクティブガラスに特有のアクティビティ依存的なレオロジーを明らかにする (9)

(1) **多重フィードバックと補償光学を用いた非平衡ソフトマターの揺らぎ応答解析** (水野)

多重フィードバックを用いて試料中の揺らぎに追随しつつ、補償光学技術を用いて不均一媒質を通過する際に生じるレーザー波面の乱れを補正し、精密な力の印加と干渉パターンの生成を実現する技術開発を進めている。

(2) **剛体球コロイド濃厚懸濁系の非線形・非平衡レオロジー** (松岡、吉良、上村、水野)

ソフトマターの多彩な非線形流動挙動のメカニズムや法則性を調べるために、単純なモデル系である剛体球コロイド懸濁液のマイクロレオロジー計測を行った。コロイド懸濁液の非線形な流動挙動は、構成要素である粒子同士の相互作用とダイナミクスに起因する。そこで基本構成粒子の“メソスケール”の力学応答をマイクロレオロジー観測することで、非線形流動の機構を本質的に理解できる。そこで、コロイド懸濁液中の単独の構成粒子に光ピンセットを用いて力を加え、その際非線形な力学挙動をマイクロレオロジー法により観測した。2重の時空間スケールのフィードバック制御を用いて実験を行い、巨視的には印加する外場の増大とともに thinning → thickening が生じるのに対して、微視的には thickening → thinning が生じることを見出した。また、巨視的な外場によって生じる流動化により実効温度が上昇すると仮定し、粒子は局所構造によるエネルギー障壁を超えることで移動すると考え、局所外力の加わった粒子の速度式を提案した。その結果、牽引実験における非線形な粘性率変化を説明できることを示した。

(3) **細胞内部環境のアクティブガラス的挙動** (田尾、江端、水野)

進化や発生の段階の異なる各種の細胞質の力学特性をマイクロレオロジーにより評価した。その結果、いずれもガラス転移近傍の振る舞いを示し、丁度細胞内濃度でジャミング転移を起こすことを見出した。他方で生きている細胞の内部環境は有限の流動性と巨大な非熱的揺らぎを示すことから、細胞は

自らの代謝活性により細胞質を自発的に駆動することで本来ガラス化するべき状態を流動下させていることを見出した。また、生細胞内でのマイクロレオロジー測定により、理論的にジャミング転移点近傍で予想されている複素弾性率の周波数依存性 $G(\omega) \propto (-i\omega)^{0.5}$ が細胞質においても観測されることを示した。一方で、代謝を抑制し非熱揺らぎが低下した細胞では低周波で弾性的な挙動が現れることを見出した。これは、細胞質が代謝により流動性を保つアクティブガラスとして振る舞っていることを示唆している。さらに、低周波極限における熱揺らぎと非熱揺らぎの大きさを比較することで細胞内の実効温度を求めた。代謝抑制剤の濃度を変えることで、細胞内の実効温度を系統的に変えることに成功した。同時に、細胞内のせん断粘度を測定した結果、細胞の粘性は実効温度にストロングガラス的な依存性を示すことを見出した。

(4) **フィードバック増強マイクロレオロジーの開発と細胞・生体組織計測** (田尾、濱田、岩崎、江端、水野)

光トラップしたプローブ粒子の変位を4分割フォトダイオードで精密計測し、さらに計測信号をもとにピエゾ駆動ステージ、およびAODを高速フィードバック制御しながら active-passive マイクロレオロジー計測を行った。従来強すぎる非平衡揺らぎのためにプローブ粒子を安定捕捉できない試料(細胞内部や遊走バクテリア溶液)でマイクロレオロジー計測を行い、揺動散逸定理の破れや非平衡揺らぎの分布形状の解析を行った。その結果、細胞内部・遊走バクテリア溶液において、低周波での強い揺動散逸定理の破れを観測している。

(5) **遊走バクテリア懸濁液中における非平衡揺らぎの統計分布** (杜海洋、水野)

培養液中で遊走するバクテリア(大腸菌)や単細胞微生物(クラミドモナス)が生み出す非平衡揺らぎが、我々の提案する新しい極限安定分布に属することを明らかにした。その時間発展を解析することで、非平衡揺らぎに新しい極限分布が現実の物理系において普遍的に現れる機構とその出現条件を明らかにした。さらに、遊走微生物が存在を許された空間の次元と、現実の空間の次元を様々に制御した実験を行うことで、この新しい極限分布が現実世界で観測される非ガウス揺らぎを一般的に表現することを示しつつある。本年度は、理論を長距離相互作用を含む形式に拡張してさらに一般化した。

(6) 細胞内液～液相分離による微細液滴形成機構のマイクロレオロジー観測（本間、水野）

近年、直接検出することが困難な微弱な相互作用が細胞内で集団として働く姿を、in vitro の相分離や相転移現象として間接的に観察する試みがなされている。顕微鏡観察できるマクロなスケールの液滴（マクロ液滴）の観察が盛んに行われ、その結果、細胞内では微弱だが集団として働く相互作用が満ちあふれており、幅広い場面で生体制御に関わっていると考えられはじめている。本年度は、予備的な実験として閉鎖チャンバーにおいて液液相分離による液滴を形成し、ビデオマイクロレオロジーによる粘弾性測定を行った。

(7) 細胞質モデルとしての濃厚エマルジョンのマイクロレオロジー計測（松岡、水野）

近年、代謝活動を行わない細胞抽出液では生体たんぱく質濃度付近で粘性が発散的にふるまいガラス化することが報告されている。また、細胞胞内において生体高分子が液液相分離を起こし液滴を形成する現象が観測されている。細胞質は剛体球コロイドに比べ、30%程度の低い固形物濃度でガラス化することが知られている。細胞質内で生体高分子が形成する液滴は内部に溶媒を含有しているために、液滴の充填率は高くなり得る。そのため、細胞質では相分離により形成された微細な液滴で混み合っている可能性がある。我々は細胞質のモデルとして濃厚エマルジョンの複素弾性率をマイクロレオロジーにて測定した。その結果、アモルファス固体などの不規則媒質に一般的に見られる異常散逸 $G'(\omega) \propto \omega^0, G''(\omega) \propto \omega^{0.5}$ が観測されることを示した。また、ジャミング転移点前後において、粘弾性がジャミングの理論から予想されていたマスターカーブにのることを示した。さらに、異常散逸はアモルファス固体に特有のボソンピークに由来することを見出し、乱雑媒質に普遍的なレオロジーであることを示した。

(8) 代謝維持装置を用いたアクティブガラスの非平衡レオロジー（濱田、江端、水野）

自己駆動するコロイドや微生物が混み合った懸濁液では、エネルギー形態の変換により生じた力に由来する非熱揺らぎが発生する。このようなアクティブガラス系では、高い粒子濃度においてもガラス化を免れて流動化する可能性が理論的・数値的な研究により指摘されてきた。一方、自己駆動粒子の濃厚系では化学物質、生理活性物質や代謝生成物の効率的な交換が必須であり、

これまで実験的に3次元アクティブガラス系は実現していなかった。我々は、半透膜を介して生理活性物質や代謝生成物を交換することで、長時間遊走する大腸菌の高濃度懸濁液を作成し、3次元アクティブガラスの実験系を初めて実現した。遊走・非遊走大腸菌の濃厚懸濁液のマイクロレオロジー測定・画像解析から、自発的な力生成によるアクティブガラスの流動化を実験的に初めて明らかにした。

(9) 数値計算を用いたアクティブガラスのマイクロレオロジーの研究（新垣、江端、水野）

ブラウン動力学法を用いて、時間的に粒径が振動するブリージング粒子の濃厚粒子系の数値計算を行った。アクティブな粒子集団の中に、粘弾性測定用のプローブ粒子を入れアクティブマイクロレオロジーを行った結果、アクティビティ依存的に粘弾性が変わることを見出した。アクティビティが0の場合、アモルファス固体特有の粘弾性 $G(\omega) = G_0 + G_1(i\omega)^{0.5}$ が現れる。アクティビティが大きくなるにつれて、低周波領域の弾性プラトー G_0 が消失することを明らかにした。

《 来年度の目標 》

研究 (1-9) のさらなる発展、及び教育の充実。

発表論文

《 原著論文 》

1. Activity-dependent glassy cell mechanics II: Nonthermal fluctuations under metabolic activity. K. Umeda, K. Nishizawa, W. Nagao, S. Inokuchi, Y. Sugino, H. Ebata, D. Mizuno, Biophysical journal **122**, 4395-4413 (2023). DOI:10.1016/j.bpj.2023.10.018
2. Measuring fluctuating dynamics of sparsely crosslinked actin gels with dual-feedback nonlinear microrheology K. Nishizawa, N. Honda, S. Inokuchi, H. Ebata, T. Ariga, D. Mizuno, Physical Review E **108**, 034601 (2023). DOI:10.1103/PhysRevE.108.034601

3. Segregation patterns in rotating cylinders determined by the size difference, density ratio, and cylinder diameter. K. Kondo, H. Ebata, S. Inagaki, Scientific Reports **13**, 13495 (2023). DOI:10.1038/s41598-023-40774-6
4. Convection of monodisperse particles in a highly filled rotating cylinder. S. Yoneta, H. Ebata, S. Inagaki, Physical Review E **109**, L022901 (2024). DOI:10.1103/PhysRevE.109.L022901
5. Self-replicating segregation patterns in horizontally vibrated binary mixture of granules. H. Ebata, S. Inagaki, Scientific Reports **14**, 5329 (2024). DOI:10.1038/s41598-024-55876-y

《その他の論文》

1. 細胞質と細胞骨格の複合系としての細胞内レオロジー. 江端宏之, 水野大介. バイオマテリアル - 生体材料 - **41-3**, 234-239 (2023).
2. 非熱的なゆらぎが分子モーターキネシンを加速させる. 有賀 隆行, 立石 圭人, 富重 道雄, 水野 大介. 生物物理 **63-2** 86-90 (2023).
3. 多重 feedback 制御されたマイクロレオロジーによる生体試料計測西澤 賢治, 水野 大介. オレオサイエンス **23-9** 491-498 (2023).

著書

講演

《海外での講演》

《国内での講演》

1. 《**28th International Conference on Statistical Physics**》
Fluctuation Dynamics and Rheology of Dense Active Suspension (oral)
Yujiro Sugino, Hiroyuki Ebata, Yoshiyuki Sowa, Daisuke Mizuno

2. **《28th International Conference on Statistical Physics》**
Activity-dependent rheology of cell cytoplasm (oral)
Hiroyuki Ebata, Daisuke Mizuno

3. **《7th International Soft Matter Conference》**
Mechanics of cell cytoplasm driven by non-thermal fluctuation (oral)
Hiroyuki Ebata, Daisuke Mizuno

4. **《7th International Soft Matter Conference》**
Fluctuation and Rheology of Dense Active Suspension (oral)
Yujiro Sugino, Hiroyuki Ebata, Yoshiyuki Sowa, Daisuke Mizuno

5. **《7th International Soft Matter Conference》**
Cytoplasmic viscoelasticity ages in ATP-depleted cells (poster)
Yuki Tao, Hiroyuki Ebata, Daisuke Mizuno

6. **《7th International Soft Matter Conference》**
Power-law relaxation of concentrated colloidal suspensions (poster)
Ryosuke Matsuoka, Shono Inokuchi, Hiroyuki Ebata, Atsushi Ikeda, Yusuke Hara, Masahiko Annaka, Daisuke Mizuno

7. **《kickoff meeting of active matter c2c》**
Active fluidization of living cytoplasm (poster)
Hiroyuki Ebata, Daisuke Mizuno

8. **《kickoff meeting of active matter c2c》**
Viscoelastic aging of the cytoplasm in metabolically inhibited cells (poster)
Yuki Tao, Hiroyuki Ebata, Daisuke Mizuno

9. **《kickoff meeting of active matter c2c》**
Power-law viscoelasticity of concentrated colloidal suspensions (poster)
Ryosuke Matsuoka, Shono Inokuchi, Hiroyuki Ebata, Atsushi Ikeda, Yusuke Hara, Masahiko Annaka, Daisuke Mizuno

10. **《kickoff meeting of active matter c2c》**

Fluctuation and Rheology of Dense Active Suspension (poster)
Yujiro Sugino, Hiroyuki Ebata, Yoshiyuki Sowa, Daisuke Mizuno

11. 《日本物理学会第78回年次大会》
局所的な外力印加下の濃厚コロイド懸濁液のマイクロレオロジー (口頭)
吉良和真, 柳島大輝, 荊原佳祐, 水野大介
12. 《第61回日本生物物理学会年会》
液～液相分離で形成されたオートファジー関連凝集体のマイクロレオロジー
(シンポジウム講演)
Daisuke Mizuno, Kairi Tomita, Makoto Fujiwara, Haruka Chino, Norr Roland,
Noboru Mizushima
13. 《第61回日本生物物理学会年会》
Characterization of activity-dependent mechanics of the cell cytoplasm (シン
ポジウム講演)
Hiroyuki Ebata, Daisuke Mizuno
14. 《第129回日本物理学会九州支部例会》
ガラスにおける異常散逸とアクティブ流動化の数値的研究 (口頭)
新垣亮宗、江端宏之、水野大介
15. 《第129回日本物理学会九州支部例会》
ATP 枯渇細胞の細胞質メカニクス (口頭)
田尾優樹、江端宏之、水野大介
16. 《Active Matter Workshop 2024》
Effective temperature-dependent rheology of living cell cytoplasm (口頭)
Hiroyuki Ebata, Daisuke Mizuno
17. 《「情報物理学でひもとく生命の秩序と設計原理」第8回領域会議》
代謝制御された細胞質レオロジーの実効温度依存性 (ポスター)
田尾優樹、水野大介、江端宏之
18. 《「情報物理学でひもとく生命の秩序と設計原理」第8回領域会議》

細胞質中の非熱揺らぎの実態とその有用性の情報熱力学解析（ポスター）
水野大介

19. 《日本物理学会 2024 年春季大会》

局所的な外場印加下の濃厚コロイド懸濁液の非線形レオロジー（ポスター）
上村泰生、吉良和真、水野大介

外部資金

《文部科学省科学研究費補助金》

文部科学省科学研究費補助金、基盤研究 (B)

非熱揺らぎの時空間スペクトル解析に基づく細胞質の非平衡挙動の解明
研究代表者：水野大介

文部科学省科学研究費補助金、新学術領域研究 (公募)

細胞質中の非熱揺らぎの実態とその有用性の情報熱力学解析
研究代表者：水野大介

文部科学省科学研究費補助金、基盤研究 (A)

非平衡系のガラス・ジャミング転移

研究代表者：宮崎 州正

研究分担者：水野大介

文部科学省科学研究費補助金、基盤研究 (C)

非熱揺らぎによる高濃度コロイド懸濁液系の流動化メカニズム解明
研究代表者：江端宏之

《文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金》

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

他大学での研究と教育

学部4年生卒業研究

上村 泰生：(指導教員、水野大介)：局所的な外場印加下の濃厚コロイド懸濁液の非線形レオロジー

本間 奏宇：(指導教員、水野大介)：RNA 結合タンパク質 FUS の粘弾性測定

修士論文

松岡 亮佑：(指導教員、水野大介)：ガラス-ジャミング領域における濃厚コロイド懸濁液の広帯域マイクロレオロジー

吉良 和真：(指導教員、水野大介)：ガラス転移点近傍における濃厚コロイド懸濁液の非線形マイクロレオロジー

杜 海洋：(指導教員、水野大介)：非ガウス揺らぎ理論の遠距離相互作用への拡張とアクティブ-ゲルへの応用

博士論文

外国人留学生の受け入れ

修士2年 杜海洋

学外での学会活動

Active Matter Workshop 世話人 (江端)

受託研究・民間との共同研究

その他の活動と成果

令和5年度 客員准教授

名古屋大学 工学研究科 教授 田仲由喜夫

物性物理学分野で、田仲由喜夫氏(名古屋大学・工学研究科・教授)が、昨年度より、客員教授に着任している。

田仲由喜夫氏は令和5年度に数回にわたって凝縮系理論研究室に滞在された。凝縮系理論研究室では、野村健太郎教授・工藤耕司助教と共同研究を行い、量子ホール系と超伝導体の界面における新規トポロジカル相と非可換エニオンの励起状態に関する議論を進めた。また、凝縮系理論研究室で推進する研究に対する助言、学生および研究員への研究指導にもご尽力いただいている。

文責:野村健太郎

令和5年度 教職員一覧

研究グループ	教授	准教授/講師	助教/准助教	研究員等
素粒子理論	鈴木 博	津村 浩二	大塚 啓	廣瀬 拓哉 (学振 PD) 岡田 寛 (学術研究員)
理論核物理	緒方 一介	湊 太志	小川 翔也 (特プロ)	
宇宙物理理論	山本 一博	菅野 優美 南部 保貞 (特プロ)	松村 央 倉持 結 (特プロ) ギャロック芳村 (特プロ)	
粒子系理論	原田 恒司+ 大河内 豊+	小島 健太郎+ 中里 健一郎+	田尾 周一郎+	福井 徳朗+(助教)
素粒子実験	川越 清以 東城 順治	吉岡 瑞樹*	末原 大幹 森津 学 調 翔平 音野 瑛俊*	細川 律也* 小川 真治* (学振 PD) 水野 貴裕 (学術研究員) Bouillaud Thomas (学振) 重松 さおり* (TS)
実験核物理	若狭 智嗣 坂口 聡志	寺西 高 市川 雄一	西畑 洗希 庭瀬 暁隆	森田 浩介++ (教授) 佐伯 恵子 (TS)
粒子系実験		有賀 智子+		
物性理論	福田 順一	松井 淳 (講師)	多羅間 充輔	
統計物理学		野村 清英		
凝縮系理論	野村 健太郎		工藤 耕司 仲井 良太 (特任)	
数理物理		成清 修		
磁性物理学		光田 暁弘		
光物性		中村 祥子		
固体電子物性	木村 崇		山田 和正 荒井 毅 (准助教) Dion Troy (特プロ)	和田裕文 (学術研究員) Hu Shaojie (学術研究員) 石間 美香 (TS) 崔 暁敏 (TS)
複雑物性基礎	木村 康之	稲垣 紫緒	小林 史明	
複雑生命物性	水野 大介		江端 宏之	
複雑流体		前多 裕介	福山 達也 (特任)	

基幹教育院+, 高等研究院++, RCAPP*, TS = テクニカルスタッフ

加速器・ビーム応用科学センター	岩村 龍典(技術職員)
-----------------	-------------

令和5年度 各種委員一覧

部門長・専攻長・学科長： 緒方

副部門長： 若狭、木村(康)

将来計画委員： ○若狭、野村(健)、光田、前多、津村、坂口、[緒方]

人事WG： ○若狭、鈴木、福田、木村(崇)、水野、東城、[緒方]

入試委員長： ○福田(全ての入試関連委員会の統括)

教育課程委員： ○山本、△緒方、前多、野村(清)、坂口、多羅間、[緒方]

教育支援室： 山本、松井

助の会幹事： 江端、森津(副幹事)

社会連携委員： 川越、寺西

奨学金資格検討委員： ○鈴木、津村、成清、市川、中村

経理委員： 水野、野村(健)

業績評価部会： 野村(健)、[緒方]

就職担当： 木村(崇)

成績管理： 寺西(成績ソフト)、松井

図書委員： 成清、湊

情報委員： ○野村(清)、松井、寺西、大塚

支線LAN管理者： 松井、大塚

広報委員： ○前多、津村、坂口、市川、小林

エントランス展示： ○寺西、前多

大学院(大学)説明会： 光田(大学院5月)、松井(オープンキャンパス8月)、山田

年次報告： 成清、津村

談話会： 稲垣

教員積立会計： 菅野

教員免許更新講習： 野村(清)、木村(康)

衛生管理： ○市川、松井、荒井、福田、山田

体験入学・オリエンテーション： ○稲垣、菅野、山田、光田、[寺西]、[坂口]、
荒井、森津、江端、西畑

いざない編集委員： 多羅間

なんでも相談窓口： 松井、江端

障害学生支援： ○坂口、成清、西畑、[緒方]

ハラスメント関連支援室： ○山本、稲垣、松井、西畑

科研費採択率向上委員： 東城

留学相談委員： 前多、森津

女子学生就学指導WG： ○稲垣、寺西、中村、松井 (○は委員長、△は副委員長)

令和5年度 物理学教室談話会

世話人 稲垣 紫緒

第1回物理学教室談話会

講演題目: 強相関係における高次高調波発生の理論

講師: 高吉 慎太郎 氏(甲南大学理工学部物理学科 准教授)

日時: 7月20日(木)14:50~16:20

場所: 物理講義室(W1-B-211)

第2回物理学教室談話会

講演題目: 量子力学の基礎と高エネルギー物理との相互交流

講師: 筒井 泉 氏(高エネルギー加速器研究機構・ダイヤモンドフェロー)

日時: 7月27日(木)16:30~18:10

場所: 物理講義室(W1-B-211)

第3回物理学教室談話会

講演題目: フェムトスコピーによるハドロン間相互作用の研究

講師: 兵藤 哲雄 氏(東京都立大学理学部 准教授)

日時: 8月2日(水)14:50~16:20

場所: 物理講義室(W1-B-211)

第4回物理学教室談話会

講演題目: トポロジカル プランクトン?

講師: 衛藤 稔 氏(山形大学・教授)

日時: 9月26日(木) 16:00~17:30

場所: 物理講義室(W1-B-211)

第5回物理学教室談話会

講演題目: Odd elastohydrodynamics: a novel description of active materials and swimming patterns in a viscous fluid

講師: Clement Moreaud 氏(京都大学)

日時: 11月6日(木)14:50~16:20

場所: 物理講義室(W1-B-211)

第6回 物理教室談話会

講演題目: 原子核におけるクラスター相関と宇宙における元素合成

講師: 川畑 貴裕 氏 (大阪大学大学院)

日時: 11月8日(木)16:30 - 18:00

場所: 物理講義室 (W1-B-212)

第7回 物理教室談話会

講演題目: 非従来型超伝導体のエッジ状態の解明からトポロジカル超伝導の理論へ

講師: 田仲 由喜夫 氏 (名古屋大学)

日時: 12月14日(木)14:50~16:20

場所: 物理講義室 (W1-D-315)

第8回物理学教室談話会

講演題目: 非マルコフ過程に対する場のマスター方程式の理論

講師: 金澤 輝代士 氏 (京都大学大学院・准教授)

日時: 1月10日(水)16:30~18:00

場所: 物理講義室(W1-A-711)

令和5年度 非常勤講師一覧

講師	所属	題目
兵藤 哲雄	東京都立大学理学部	散乱理論とハドロン共鳴状態の構造
衛藤 稔	山形大学理学部	トポロジカルソリトンの基礎と応用
高吉 慎太郎	甲南大学理工学部	レーザー駆動超高速スピントロニクス
金澤 輝代士	京都大学大学院理学研究科	統計物理学のための確率過程の基礎とその応用
川畑 貴裕	大阪大学大学院理学研究科	核反応で探る原子核のクラスター相関
田仲 由喜夫	名古屋大学大学院工学研究科	超伝導接合の物理
筒井 泉	高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所	量子力学の基礎とその応用

令和5年度 外国人研究者等受入記録

所属・職・氏名	所在地	受入目的	受入期間	受入者
HU SHAOJIE	中国	学術研究員	令和4年11月1日～ 令和6年3月31日 (既受入期間: 令和4年11月1日～ 令和5年3月31日)	木村 崇
BOUILLAUD THOMAS	フランス	外国人特別研究員 (JSPS)	令和6年1月4日～ 令和8年1月3日	東城 順治

令和5年度 教育課程委員会活動報告

山本 一博

2023年4月1日における委員名簿と各委員の役割

役割	担当者
委員長	山本
副委員長	緒方
時間割・シラバス	坂口
学科 FD	前多
コース分属	山本
中期計画	山本
過年度担当	松井、多羅間、山本
特研配属	坂口
カリキュラム	野村
基幹教育科目	前多
アンケート	山本
授業参観	山本
文書確認	山本
国際コース	緒方

2023年度の教育課程委員会の活動を列挙すると以下のようになる:

- ・アドバイザー担当決定
- ・学部新入生オリエンテーションにおける授業履修関連事項の説明、企画と実行
- ・学部編入生オリエンテーションにおける授業履修関連事項の説明、企画と実行
- ・大学院生新入生オリエンテーションにおける授業履修関連事項の説明、企画と実行
- ・過年度生に対する個別の履修指導
- ・学習支援室の体制の整備、役割(過年度生の学習支援など)の設定、TA の設定
- ・合理的配慮を必要とする学生への対応の連絡と調整・講義、シラバス入力の設定
- ・学生の入試形態別学力の追跡調査
- ・新入生 基礎学力調査の実施・「大学の実力調査」への対応
- ・物理数学に関する2年生学力調査
- ・教職免許担当教員の調整
- ・2024年度からの基幹教育カリキュラムの変更点の点検と検討
- ・カリキュラムに関するアンケートの実施
- ・基幹教育科目部局担当コマに関連する調整

- ・ 基幹教育科物理学実験 TA 担当者の調整
- ・ 転学科・転学部希望学生への対応
- ・ 大学院紹介パンフレット作成協力
- ・ 後期の授業時間割の確認、調整
- ・ 過年度生の 2 年次進級判定の準備
- ・ 国際コース配属学生への対応
- ・ 学部入学者に係る個人用パソコンの仕様の設定点検
- ・ 次年度の講義担当希望調査、原案作成および調整
- ・ 学生実験担当者のミーティング
- ・ 授業アンケート実施・問題点への対応
- ・ 国際コースに関連した外国語を用いた科目の設定案作成、調整
- ・ 担任、アドバイザーによる成績不振者との面談と修学指導
- ・ 他学科科目等の単位認定申請に対する対応
- ・ 2024年度入学者向けの専攻科目一覧案及び時間割案作成
- ・ 物理学科ファカルティディベロプメント(FD)『大学院の魅力創造に向けて』の実施
- ・ 学外非常勤講師授業計画作成
- ・ 『修得単位自己チェック表』の確認
- ・ 大学院特別講義番号の設定
- ・ 2023年度入学者対象のコース配属予備調査
- ・ 特別研究生配属調整
- ・ 次年度進級・新入生・編入生ガイダンス計画
- ・ コース配属
- ・ 次年度理学部・理学府履修の手引きの確認作業
- ・ 博士課程プログラムの自己点検・評価、および成果配分指標改善に向けた数着目標および行動計画案の立案

当該年度は、前年度の Covid-19 のまん延防止措置等で確立した Web 会議システムを用いた授業ハイブリッド(ハイフレックス)型講義を必要に応じて用い、対面型での授業実施を行った。前年度に研究室配属に関する方法を検討し直し、学生の希望に沿いながら、また配属数がゼロとなる研究室がないような改革を行なったため、それに基づいた研究室配属を実施したが、問題がないか今後引き続き注視する必要がある。1年次、2年次における物理数学を含むカリキュラムは今後も検討課題であり、2年生の初めに物理数学に関する基礎学力試験による定点観測を開始した。これに関連して、物理学入門Ⅱの運用を見直し、令和6年より物理数学に関する授業を充実させる内容とした。従来以上に、博士学生の充足率が問題となっており、大学院博士学生の定員に関する見直しの議論を行なった。博士学生の経済的・キャリアパスの支援と取り組みと合わせて今後も課題である。関連して、博士学位審査に関する基準の見直しを行なった。カリキュラムに関するアンケートを実施した。基幹教育課程に関する改革に伴い、基幹教育および専攻教育の物理学科および物理学コースのカリキュラムを見直す方針となった。令和7年度からカリキュラムの変更を行う予定であり、教員および学生の意見を反映させる教育カリキュラムを構築する計画である。

令和5年度 物理学部門ファカルティ・ディベロップメント報告

「大学院の魅力創造に向けて」

日 時： 2024年2月20日(火曜) 15:30-17:00

場 所： ウェスト1号館 B211(対面)と Zoom meeting(オンライン)のハイブリッド形式で開催

講 演： 沖縄科学技術大学院大学・教授 根本 香絵 先生

九州大学基幹研究院自然科学理論系部門・教授 原田 恒司 先生

物理学部門では、大学院理学研究院・大学院理学府の中期目標・中期計画を軸にファカルティ・ディベロップメントを行っている。本年度は、本年度は「大学院の魅力創造に向けて」をテーマとしたFDセミナーを開催した。講演者には沖縄科学技術大学院大学(OIST)の根本香絵 教授をお迎えし、OISTにおける魅力ある大学院プログラムや量子分野オンライン教材の取組等についてご講演いただいた。OISTは国際的な研究環境と大学院教育システムを構築しており、その内容についてご紹介いただき、修士課程のみならず博士課程への進学に向けた大学院生の経済的サポートや研究支援について意見交換を行った。さらに根本先生が取り組まれる光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)におけるオンライン教材についてご説明をいただき、日本全国の大学生・大学院生が受講し学びを得ることで量子技術の専門性と高度スキル人材に期待される技能の教育システムについて議論が行われた。根本先生のご講演に続き、基幹教育院の原田先生より、大学院において専門性を獲得することを見据えた基幹教育院での教育プログラムの現状についてご紹介があった。さらに、大学初年時程度から研究活動について関心を引きつける授業の設置について意見交換が行われ、基幹教育から大学院教育までを見通した取り組みが充実することで、学生を引きつける魅力ある大学院プログラムになることが議論された。

FDセミナーの最後には自由討論が行われ、OISTの取り組みと九州大学の取り組みの双方を比較することで、特色ある大学院教育を実現するための課題と展望が参加者から述べられた。以上のように、本年度のFDセミナーは当研究院・当専攻の授業の理解度を高める方策を共有する場となった。

令和5年度 入学者数と卒業生数

	入学者数	卒業生数
物理学科(情報理学コースを含む)	57	64
物理学科3年次編入	3	—
修士課程(物理学専攻)	40	45
博士課程(物理学専攻)	7	5

※修士課程 40

内訳 4月入学(40)、10月入学:国際コース(0)

令和5年度 就職・進学状況

前年度に回復の兆しを見せていた日本経済は、今年度さらに活発化し、雇用の需要も一層増加しました。学生にとっては昨年同様、売り手市場となり、九大全体、さらには物理学科・専攻においても求人倍率は前年を上回る結果となりました。また、インフレに伴い給与水準も上昇傾向にあり、就職における好条件が続いています。一方で、就職活動の時期が早まっていることは非常に深刻な問題と感じています。特に大学院生は、入学後すぐにインターンシップなどに積極的に参加し、活発な就職活動を行っています。そのため、研究時間の確保や修士論文の水準維持に関して、各指導教員が様々な工夫や苦勞を重ねているように感じられます。就職担当教員としても、民間の採用活動に精通しているわけではないため、リクルートやマイナビなど大手人材エージェントの担当者を通じて最新の動向を把握するとともに、学生向けのセミナーを複数回開催し、学生に有益な情報を提供するよう努めています。しかしながら、これらのセミナーやOB訪問などの企業説明会に参加する学生の数は年々減少しており、何らかの対策が必要だと感じています。さらに、推薦書の重要性も以前と比べて大きく変わってきています。企業によっては後付けの推薦書を求める場合も多く、就職担当教員としては、学生が後悔のない選択をできるよう、引き続きサポートしていきたいと考えています。以下に、内定先の一覧を示します。学部生の90%以上が修士課程(他大学を含む)に進学しており、その多くは修士課程における内定先です。

【2024.3 卒業生の内定先一覧(修士)】

株式会社日立製作所、株式会社レゾナック、TOTO株式会社、西日本電信電話株式会社、株式会社ガンバリオン、パナソニックコネクト株式会社、株式会社日立製作所、株式会社福岡銀行、株式会社PLANET、楽天グループ株式会社、九州電力株式会社、株式会社NTTデータ、ダイキン工業株式会社、みずほリサーチ&テクノロジー株式会社、TOTOウォシュレットテクノ株式会社、パナソニックインダストリー株式会社、金融業/J1. Finance、日鉄ソリューションズ株式会社、株式会社カプコン、ルネサスエレクトロニクス株式会社、鵬技術コンサルタント株式会社、株式会社NTTドコモ、株式会社野村総合研究所、日本電気株式会社、アジア航測株式会社、日産自動車株式会社、株式会社とめ研究所、川田テクノシステム株式会社、株式会社NHKエデュケーショナル、ソニーセミコンダクタマニュファクチャリング株式会社

【2024.3 卒業生の内定先一覧(学部)】

株式会社スリーエイ・システム、アマゾンウェブサービスジャパン合同会社、日本IBMグループ、株式会社アクセ、高知電子計算センター、空研工業株式会社、

令和5年度 体験入学・公開講座報告

担当: 稲垣 紫緒

本年は定員 50 名の現地開催と Zoom オンライン会議を併用したハイブリッド開催として、令和 6 年 3 月 28 日(木)に 51 名の対面講義と、30 名のオンライン講座のハイブリッド形式で「第 27 回体験物理学」を開催した。実際のセミナーの内容、スケジュール、担当者は下記のプログラムに示す。物理学部門では、毎年 3 月の春休み期間を利用して、高校 1・2 年生を対象とした体験入学を実施している。このうち講義部分を公開講座として広く開放することとし、大学への 3 年次編入を考えている高等専門学校生への説明会を兼ねている。例年と同様に、福岡県内の全ての高校と周辺県の有力高校に案内状を送り参加者を募集した。近年、理科離れや学力低下が叫ばれるようになり、理科に対する興味・関心や学習意欲を喚起する必要性がますます高まっている。体験入学は今年度で 27 回目を数え、当部門がいち早くその重要性に気づき活動してきたものと自負している。体験入学参加者の住所は福岡を中心に、大分、長崎、佐賀、鹿児島など広範囲にわたり、広く認知されている。新型コロナの影響も収まってきたことから、対面参加の人数を緩和し、去年より多い 51 名の対面参加があった。オンライン講義の希望者も 30 名おり、ハイブリッド形式による開催は遠隔地からの参加を希望する学生にとってメリットがあることがうかがえた。参加者からは、素粒子と宇宙の関係、日常に潜む現象の物理学についてなど、数多くの質問があり、物理に興味を持ってもらう意義が果たされている。女子学生の参加者も 20 名ほどおり、女子学生の進学希望者増加に効果が期待される。

午前の部には物理学科紹介に続いて2件のセミナーを行い、素粒子物理学・宇宙物理学・物性物理学の最先端の内容について体験授業を行った。質問も数多く出たことやイベント終了後のアンケートでも2件ともセミナーの難易度は適切で講義内容も関心が深いという意見が大多数を占めたことから、高校生・高専生の興味を引きつけるものであったことが伺える。

後の部には大学生・大学院生・教員を交えた懇談会とオンライン研究室見学ツアー(素粒子実験研究室、複雑生命物性研究室)を行った。大学での物理学の学習や、研究の進め方などについて重点を置きながら2研究室の紹介を行って頂いた。大学院生との座談会では物理学科を目指したきっかけ、大学時代の過ごし方など、学生自身の体験と大学で学ぶ物理の魅力を参加者と情報共有することができた。事後アンケートでは、この企画は大変好評で、体験入学イベント終了後にも参加生徒から質問をメールで頂く等、概ね好評であったと考えている。一方で、体験実験が開催されなかつ

た点に惜しむ声もあった。次回開催では体験実験プログラムの再開を検討するなど、体験物理学イベントの内容を充実させて行くことが重要である。

[プログラム]

	3月28日(木)
9:40～	対面講義会場・オンライン会場入室開始
10:00～10:40	開校式
10:40～11:10	「重力・宇宙と量子情報科学」(講師:松村 央 助教)
11:10～11:25	15分休憩
11:25～11:55	「フラストレーションが生み出す現代物理 — 今は「花より電子」—」 (講師:工藤 耕司 助教)
昼休み	
13:00～14:30	オンライン研究室ツアーと大学生との懇談会
14:30～14:45	閉校式

参加募集 HP

【3/28】第27回体験物理学～物理の世界を体験しよう～ https://www.phys.kyushu-u.ac.jp/koho/event/event_240119a.html

「九州大学理学部物理学科 公開講座」

https://www.phys.kyushu-u.ac.jp/koho/event/event_240119b.html

令和5年度 社会貢献活動報告

社会連携委員 寺西高

1 先端科学普及事業(高校への出張講義など)

以下の高校等において、模擬講義及び理学部・物理学科の説明(入試状況、カリキュラム、就職状況等)、または研究室紹介を行った。

筑紫女学園高等学校(会場は九州大学理学部)

開催日:2023年7月14日(金)

対象:2年生 参加人数35名程度

研究室紹介担当: 中村祥子 准教授、稲垣紫緒 准教授

駿台予備校福岡校(会場は伊都キャンパス)

開催日:2023年10月21日(土)

対象:1・2・3年生 参加人数30名程度

講義担当:西畑洸希 助教

西南学院高等学校

開催日:2023年10月31日(火)

対象:2年生 参加人数30名程度

講義担当:市川雄一 准教授

2 先端科学体験事業(高校生の体験入学など)

第27回体験物理学～物理の世界を探検しよう～

開催日:2024年3月28日(木)

対象:高校生 参加人数 50名

ハイブリッド形式(対面:九州大学理学部)

担当:稲垣紫緒 准教授、菅野優美 准教授

3 オープンキャンパス

令和5年8月6日(日)開催

- 学科説明(パネル展示)
- 企画展 物理がわかる階段(パネル展示)
- 進路・就職状況, 入学試験の説明会
- 特別講義
講義1「統計物理学入門」(松井淳 講師)
講義2「量子論入門」(津村浩二 准教授)
講義3「量子計算機科学技術への誘い」(廣川真男 教授)
- 施設見学
・加速器・ビーム応用科学センター
・低温センター
- オンライン企画
物理学科コース紹介動画および物理学科パンフレットをWeb掲載

4 中等教育担当教員研修事業(高校教育を対象としたリカレント教育)

開催日:2023年8月10日(水)

対象:福岡県高校理科教諭 参加人数 26名

実施場所:九州大学理学部

講義担当:菅野優美 准教授

研究室等見学担当:寺西高 准教授、光田 暁弘 准教授

5 展示 WG 令和5年度(エントランスホール)

- 1) ナノ構造で顕在化する量子伝導現象とその可能性(ケース)
- 2) 九州大学における加速器開発の歴史(ケース)
- 3) 物理学部門の概要—物性物理学分野(パネル)
- 4) 物理学部門の概要—粒子物理学分野(パネル)